

Biopolttoainekattilan palamisilman mittaus

Tuomas Kömi

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015

Energiatekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala





Tekijä Kömi, Tuomas	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 27.05.2015
	Sivumäärä 46	Julkaisun kieli Suomi
		Verkkojulkaisulupa myönnetty: (x)
Työn nimi Biopolttoainekattilan palamisilman mittaus		
Koulutusohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaajat Marjukka Nuutinen, Mari Vasara		
Toimeksiantaja Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalousinstituutti		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalousinstituutin kattilatestauslaboratorio. Työn aihe oli 40 kW:n biopolttoainekattilan palamisilmojen mittaus. Laboratorion kattiloilla ei ollut palamisilman mittausta. Ilmamäärää säädettiin puhaltimien kierroslukua muuttamalla. Mittausta varten oli hankittu anturit ja tehty mittauskanavat.</p> <p>Tavoitteena oli selvittää puhaltimien pyörimisnopeuden vastaavuus anturien mittauksiin, ilman virtaukseen vaikuttavat asiat ja anturien käytettävyys palamisen hallinnassa. Työssä muuttujina olivat polttoaineen kosteus, kattilan teho ja palamisilman määrät ensiö- ja toisioilmapuhaltimilla. Mittaukset todennettiin käsikäyttöisellä L-tyypin pitot-putkella. Laskettiin myös palamisen ilmakerroin sekä mittausten, että savukaasujen happipitoisuuden perusteella.</p> <p>Työssä onnistuttiin selvittämään puhaltimien pyörimisnopeuden ja niiden tuottaman tilavuusvirran suhde. Saatiin myös tietoa eri muuttujien vaikutuksista virtauksiin. Tuloksien perusteella arvioitiin anturien hyödyllisyyttä palamisen hallinnassa.</p> <p>Mittauksista todettiin olevan hyötyä palamisilmojen säätämisessä, koska niiden avulla nähdään säätöjen vaikutusten suuruus virtauksiin. Mittareilla voidaan myös huomata, jos virtauksessa on häiriöitä, esimerkiksi arinan ilma-aukot ovat tukkeutuneet. Ensiö- ja toisioilman suhteen säätäminen sopivaksi on helpompaa mittausten avulla kuin puhaltimen pyörimisnopeutta muuttamalla, sillä pyörimisnopeuden ja tilavuusvirran suhde on erilainen puhaltimien välillä.</p>		
Avainsanat (asiasanat) arinapoltto, palamisilma, pitot-putki, puhaltimet, tilavuusvirta, virtausmittaus		
Muut tiedot		



Author Kömi, Tuomas	Type of publication Bachelor's thesis	Date 27.05.2015
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 46	Permission for web publication: (x)
Title of publication Measuring combustion air flow in biofuel-fired heating boiler		
Degree programme Degree programme in Energy Technology		
Tutor(s) Nuutinen, Marjukka Vasara, Mari		
Assigned by JAMK University of Applied Sciences, Institute of Bioeconomy		
<p>Abstract</p> <p>The thesis was assigned by the heating boiler testing laboratory of JAMK University of Applied Sciences. The topic was gauge combustion air flow in 40 kW biofuel-fired boiler. Combustion air for the boilers of the laboratory had not been measured. The airflows were controlled by adjusting the rotation speed of the fans. Airflow sensors had been acquired and air ducts had been made for measuring.</p> <p>The goals of the thesis were to determine the correlation between the rotation speed of the fans and the airflow, the factors affecting the airflow, and the usability of the sensors in controlling the combustion. Moisture content of wood chips, boiler efficiency and flow velocity of primary and secondary air were the variables in the thesis. The results of the measurements were verified with measurements that were made with L-type Pitot tube. In addition, the air ratio of the combustion was calculated based on the measurements and the oxygen content of combustion gas.</p> <p>Based on the results there was a correlation between the rotation speed of the fans and volume flow solved. Also the effects of various variables were found. In addition, using sensors to control the combustion was evaluated.</p> <p>The measurements were found useful in regulating the combustion air because the effects of adjustments to airflow can be seen in the gauges. Gauges can also indicate a problem in the flow, for example, if the air holes in the grate have clogged. The ratio of primary and secondary air is easier to adjust using the gauges than by controlling the rotation speed of the fans because the correlation between the airflow and the rotation speed is different for different fans.</p>		
Keywords/tags (subjects) combustion air, fans, fixed bed combustion, flow measurement, Pitot tube, volume flow		
Miscellaneous		

Sisältö

1 Lähtökohdat ja tavoitteet.....	4
2 Hakkeen poltto arinalla	5
2.1 Palamisen teoria	5
2.2 Arinapoltto	8
2.3 Kattilatyypit.....	10
2.4 Palamisen hallinta	13
2.5 Päästöt	15
2.6 Palamisilman tarve	18
3 Puhaltimet.....	20
3.1 Keskipakopuhallin.....	20
3.2 Kierrosnopeuden vaikutus.....	21
4 Ilman virtaus ja sen mittaaminen	23
4.1 Ilman virtaus putkessa.....	23
4.2 Virtauksen mittaaminen	24
4.3 Pitot-putki.....	25
4.4 Annubar-putki	27
4.5 Mittausten suunnittelu	28
5 Mittausten toteutus ja tulokset.....	30
5.1 Laitteiston esittely	30
5.2 Pyörimisnopeuden ja tilavuusvirran vastaavuus	32
5.3 Mittausten todentaminen käsikäyttöisellä pitot-putkella.....	34
5.4 Puhaltimien keskinäinen vaikutus	37
5.5 Polttoaineen kosteuden vaikutus	38
5.6 Polttokokeet.....	39
5.7 Mittausvirheet.....	42
6 Yhteenveto	43
Lähteet.....	45

Kuviot

Kuvio 1. Laboratorion 40 kW:n bioenergiakattila	5
Kuvio 2. Puun palaminen ja lämmönkehitys	7
Kuvio 3. Liikkuva viistoarina.....	8
Kuvio 4. Kekoarina kosteille polttoaineille.....	9
Kuvio 5. Ruuvisyöttöinen yläpaloinen hakekattila	11
Kuvio 6. Alapalokattila	12
Kuvio 7. Hiilivetypäästö kasvaa jyrkästi, kun häkäpitoisuus ylittää kynnsarvon	15
Kuvio 8. Puun kosteuden vaikutus liekin lämpötilaan.....	16
Kuvio 9. Vasemmalla keskipakopuhallin ja oikealla aksiaalipuhallin.....	20
Kuvio 10. Puhaltimen tai pumpun ja verkoston ominaiskäyrät.	22
Kuvio 11. Virtausnopeusprofiili putkessa	24
Kuvio 12. L- ja S-tyypin pitot-putket.....	26
Kuvio 13. Annubar-putki	27
Kuvio 14. Anturit mittausputkissa	29
Kuvio 15. Paine-eromittarit.....	30
Kuvio 16. Multijet-poltin	31
Kuvio 17. Kattila ja polttoainesäiliö	32
Kuvio 18. Kierrosnopeuden vaikutus tilavuusvirtaan	33
Kuvio 19. Anturin ja käsimittauksen vertailu, ensiöpuhallin.....	34
Kuvio 20. Käsimittauksen ja anturin vertailu, toisiopuhallin.....	35
Kuvio 21. Mittauspisteiden sijainti	36
Kuvio 22. Puhaltimien keskinäinen vaikutus, ensiöpuhallin	37
Kuvio 23. Polttoaineen kosteuden vaikutus	38
Kuvio 24. Virtaukset kylmällä polttimella ja palamisen aikana	41

Taulukot

Taulukko 1. Tilavuusvirta mittauspisteissä	36
Taulukko 2. Polttokokeiden tulokset.....	40
Taulukko 3. Alipaineen vaikutus virtaukseen	42

1 Lähtökohdat ja tavoitteet

Työn aihe on 40 kW:n kiinteitä biopolttoaineita käyttävän kattilan palamisilmojen mittausta reaaliajassa. Toimeksiantaja on Jyväskylän ammattikorkeakoulun Biotalousinstituutin kattilatestauslaboratorio. Laboratorion kattiloilla ei ole palamisilman mittausta. Ilmamäärää säädetään puhaltimien taajuusmuuttajalla, jolla puhaltimien kierroslukua säädetään prosentteina. Todellista ensiö- ja toisioilman määrää ei siis tiedetä. Palamisen hallinnassa on kuitenkin tärkeä tietää ilmamäärien suhde ja kierrosnopeussäädön vaikutus virtauksiin. Mittausta varten on hankittu anturit ja paine-eromittarit sekä tehty putket, joihin anturit voidaan asentaa (kuviot 13, 14 ja 15). Työssä käytetään Ariterm Oy:n 40 kW:n bioenergiakattilaa (kuvio 1), jossa polttimena on liikkuva porrassarina. Ensiö- ja toisioilmalle on erilliset puhaltimet.

Työssä tehdään selvitys ilman virtauksen mittaamisesta, asennetaan anturit ja tutkitaan anturoinnin toimivuus kylmällä kattilalla ja polttokokeilla. Mittauksia varten tehdään ajomatriisi, jossa muuttujina ovat polttoaineen kosteus, kattilan teho ja palamisilman määrä ensiö- ja toisioilmapuhaltimilla. Mittaustuloksia verrataan käsikäyttöisellä L-tyypin pitot-putkella tehtäviin mittauksiin.

Tavoitteena on selvittää puhaltimien pyörimisnopeuden vastaavuus anturien mittauksiin, ilman virtaukseen vaikuttavat asiat ja anturien käytettävyys palamisen hallinnassa.

Tuloksien perusteella pohditaan anturoinnin toimivuutta, ja todetaan puhaltimien kierrosnopeuden suhde ilman virtaukseen ja anturien käytettävyys palamisen hallintaan. Jos anturit osoittautuvat hyvin toimiviksi ja niistä on hyötyä palamisen hallinnassa, voidaan antureita jatkossa käyttää kattilalla tehtävissä testeissä. Vastaavat anturit ja putket voidaan tällöin asentaa myös laboratorion toiseen kattilaan.

Puhaltimien kierrosnopeuden ja virtauksen suhde ja eri muuttujien vaikutukset kertovat mittausten tarpeellisuudesta. Jos esimerkiksi kierrosnopeus on suoraan verrannollinen ilman tilavuusvirtaan ja suhde on sama molemmilla puhaltimilla, anturointi ei

välttämättä ole tarpeellinen. Mitä enemmän virtausnopeus vaihtelee palamisen aikana ja eri muuttujien vaikutuksesta, sitä enemmän mittauksista on hyötyä.



Kuvio 1. Laboratorion 40 kW:n bioenergiakattila

2 Hakkeen poltto arinalla

2.1 Palamisen teoria

Palamisessa aine yhtyy kemiallisesti happeen, jolloin vapautuu lämpöä. Puun palaminen tapahtuu seuraavissa vaiheissa:

- Puun lämpeneminen noin 100 °C:een
- Puun kuivuminen
- Kaasumaisten, palavien yhdisteiden vapautuminen (pyrolyysi)
- Kaasujen syttyminen ja palaminen
- Kiinteän hiilen palaminen, jäljelle jää tuhkaa.

Arinapoltossa puu kaasuuntuu ensiöilmassa ja kaasut poltetaan toisioilmalla.

(Airaksinen, Alakangas, Alanen, Kainulainen, Puhakka, Siponen & Soini 2001, 39; Alakangas, Erkkilä & Oravainen 2008, 41.)

Kiinteän polttoainekappaleen palamiseen vaikuttavat sen kemialliset, rakenteelliset ja fysikaaliset ominaisuudet. Kemiallisia ominaisuuksia ovat reaktiivisuus, pyrolysoitumislämpö ja lämpöarvo. Rakenteellisia ominaisuuksia ovat palakoko, tiheys ja huokoisuus sekä fysikaalisia lämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus. Palamisnopeutta rajoittaa usein joko lämmönsiirto-, aineensiirto- tai kemiallinen reaktionopeus.

Aineensiirrolla tarkoitetaan muun muassa kosteuden siirtymistä polttoaineen sisällä.

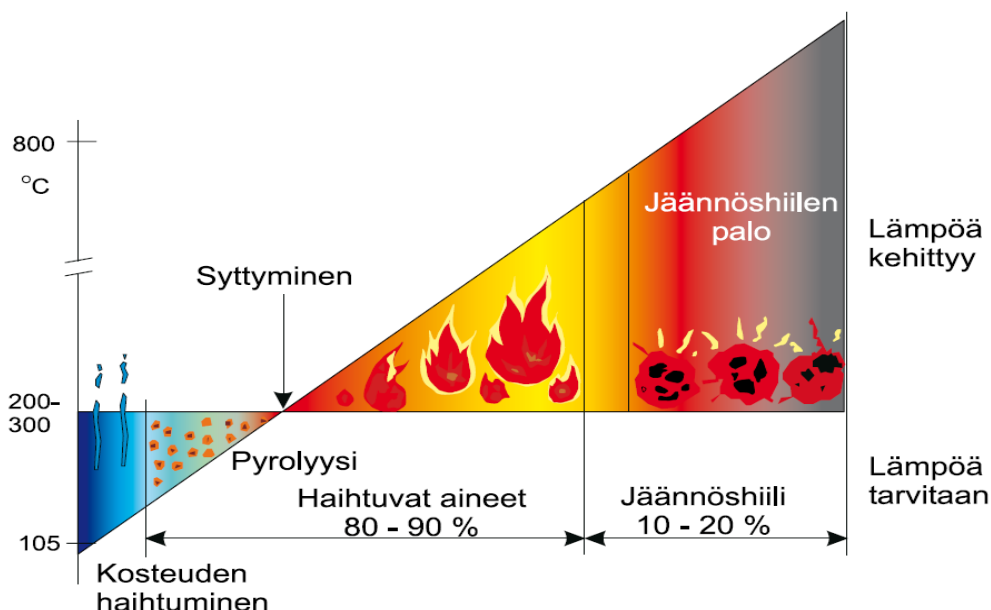
(Alakangas ym. 2008, 41–42.)

Syttymisvaiheessa puusta vapautuu vesihöyryä, haihtuvia hiilivetyjä ja alhaisessa lämpötilassa syntyviä pyrolyysikaasuja. Pyrolyysikaasut syttyvät palamaan, kun ne kuumenevat ja niiden pitoisuus kasvaa riittävän suureksi. Pyrolyysissä polttoaineen suuret molekyylit hajoavat ja niistä syntyy palavia kaasuja, nestemäisiä tervoja ja vähän palamattomia kaasuja. (Mts. 42.)

Palamisvaiheeseen kuuluu polttoaineen lämpeneminen, voimakkaan palamisen vaihe ja hiipuminen. Pyrolyysi on nopeinta palamisvaiheessa ja hidastuu palamisen hiipuesssa.

Kiinteän hiilen palaessa pyrolyysikaasuja ei juuri muodostu, ja hiillos palaa liekittä.

Kaasujen ja jäännöshiilen palaessa syntyy lämpöä, mutta kuivumiseen, syttymiseen ja pyrolyysiin tarvitaan ulkopuolista lämpöä (kuvio 2). (Mts. 42.)



Kuvio 2. Puun palaminen ja lämmönkehitys (Alakangas 2008, 42)

Polttoaineen kosteudella on suuri vaikutus pyrolyysiin ja palamiseen. Kosteus hidastaa syttymistä ja pyrolysoitumista ja laskee liekin lämpötilaa. Kosteuspitoisuus vaikuttaa myös pyrolyysikaasuihin ja jäännöshiilen määrään. (Mts. 42.)

Puu syttyy sen ympärille kertyvien pyrolyysikaasujen vaikutuksesta. Syttyminen tapahtuu noin 270 °C:een lämpötilassa reaktioiden lämmöntuoton ylittäessä lämpöhäviöt. Puun kosteudella, palakoolla ja tulipesän lämpötilalla on suuri vaikutus syttymiseen. Suurella palakoolla syttyminen kestää kauemmin kuin pienellä, koska lämpeneminen ja kuivuminen tapahtuvat hitaammin. (Mts. 43.)

Pyrolyysin nopeus ja siinä syntyvien kaasujen määrä riippuvat lämpötilasta. Lämmitettäessä puuta hitaasti 800–900 °C:een noin 80 % sen massasta pyrolysoituu. Jos puu lämpenee hitaasti (alle 10 °C/s) ja alle 500 °C:een lämpötilaan, muodostuu paljon tervaa ja jäännöshiiltä. Nostettaessa lämpötilaa nopeammin ja korkeammalle, syntyy enemmän kevyitä hiilivetyjä ja jäännöshiilen määrä on pienempi. (Mts. 43.)

Palamisen edetessä kasvaa hiilen määrä suhteessa vetyyn ja jäljelle jää jäännöshiili. Kaasuja syntyy tässä vaiheessa vain vähän ja palaminen tapahtuu hiilen pinnassa ilman liekkiä. Jäännöshiilen lämpöarvo on suuri, joten sen palamisesta saatava lämpömäärä on

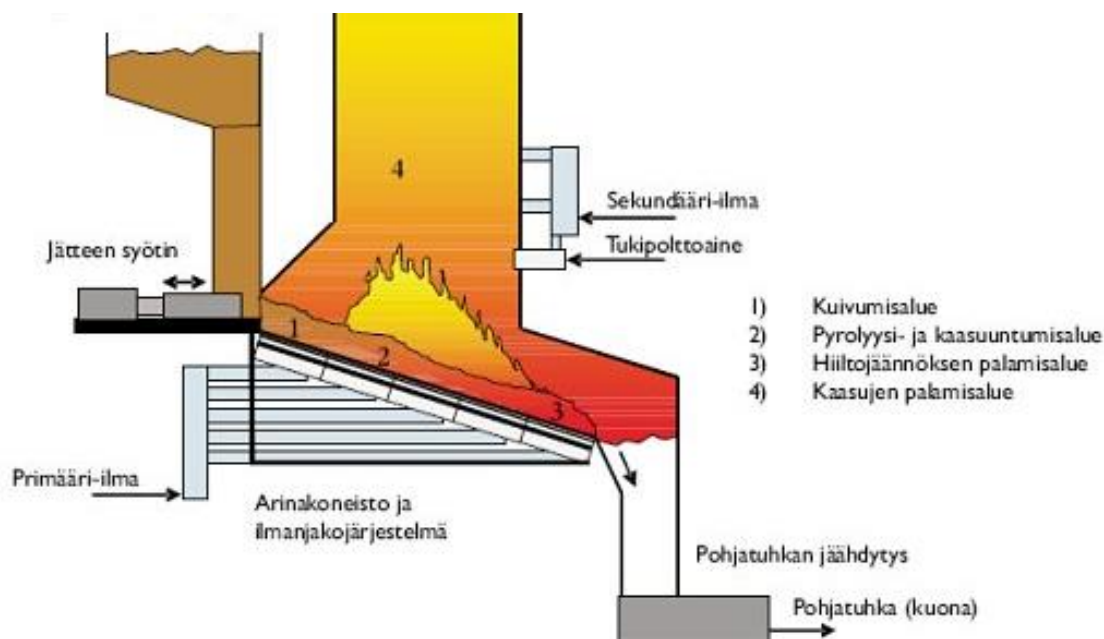
25–50 % koko palamistapahtumasta saatavasta lämpömäärästä, vaikka sen osuus kuiva-aineesta on biomassapolttoaineilla vain 10–30 %. (Mts. 44.)

2.2 Arinapoltto

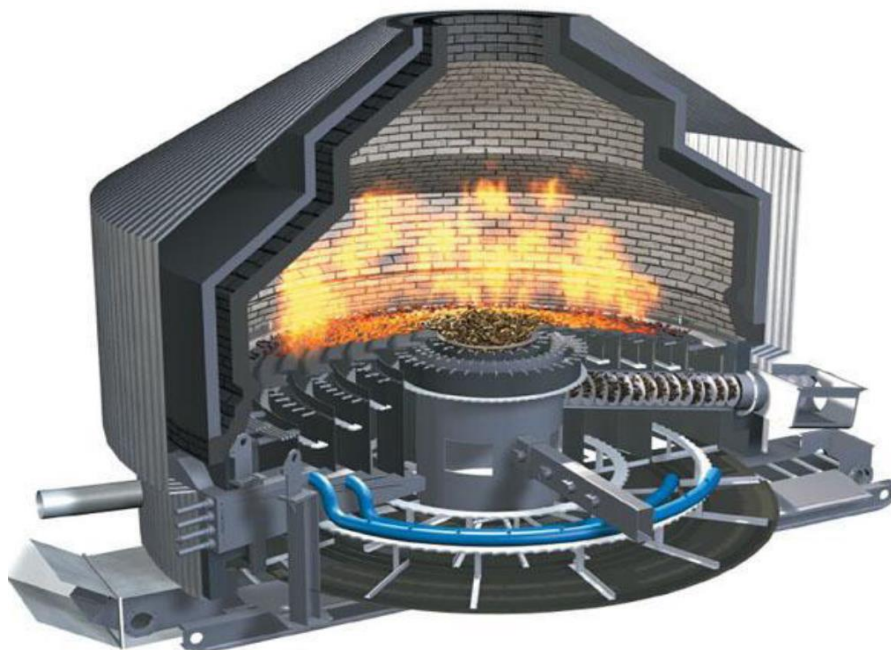
Arinatekniikka on alun perin kehitetty kivihiilen polttoon. Nykyään sitä käytetään biomassan polttoon 30 MW:n tehoon saakka. Arinapoltto on yleisin puun ja palaturpeen polttomenetelmä alle 10 MW:n teholuokassa. (Flyktman, Impola & Linna 2012, 16.)

Arinatyyppit

Arinan rakenne riippuu polttoaineesta ja kattilan koosta. Arinatyyppejä ovat esimerkiksi taso-, viisto-, keko- ja porrassarina (kuviot 3 ja 4). Arina voi olla kiinteä tai liikkuva. Liikkuvaa arinaa käytetään etenkin suurissa kattiloissa, ja se mahdollistaa myös runsastuhkaisen polttoaineen, kuten palaturpeen, polttamisen. Pienissä polttimissa arinaa jäähdytetään ensiöilmalla, joka syötetään arinarakojen välistä. Suurissa polttimissa arina on yleensä vesijäähdytteinen. (Airaksinen ym. 2001, 39; Motiva n.d.)



Kuvio 3. Liikkuva viistoarina (Jätelaitosyhdistys 2006)



Kuvio 4. Kekoarina kosteille polttoaineille (MW Power), jossa polttoaine sekoittuu arinarautojen pyörimisen vaikutuksesta (Flyktman ym. 2012, 17)

Prosessi

Arinan alkupäässä polttoaine kuivuu yleensä säteilylämmön vaikutuksesta. Kuivan polttoaineen lämpötila nousee, ja haihtuvat aineet alkavat pyrolysoitua. Kiinteällä viistoarinalla polttoaine etenee painovoiman vaikutuksesta, ja mekaanisella arinalla polttoainetta siirretään mäntämäisillä työnnoilla. Ensiöilma syötetään arinaraoista polttoainepatjan läpi ja toisioilma haihtuvien kaasujen palamistilaan patjan yläpuolelle. Tuhka putoaa arinatyyppistä riippuen arinan raoista tai arinan päästä tuhkatilaan. Savukaasun mukana poistuvan tuhkan ja polttoainehiukkasten määrä riippuu kaasun virtausnopeudesta ja hiukkasten koosta. (Motiva n.d.)

Palamisilman jakaantumiseksi tasaisesti polttoainepatjaan tulee polttoaine syöttää arinalle tasaisesti. Jos levittyminen on epätasaista, palamisilmaa virtaa enemmän vähän virtausvastusta aiheuttavista kohdista. Ongelmaa voidaan pienentää suunnittelemalla arina siten, että arinan aiheuttama virtausvastus on polttoainepatjan aiheuttamaa suurempi. (Mt.)

Arina- ja stokeripolton ominaisuuksia

Arinalla voidaan polttaa laadultaan vaihtelevia polttoaineita. Polttoaineen kosteus voi erityisrakenteisilla polttimilla olla enintään 65 %, ja palakoko riippuu ensisijaisesti syöttölaitteistosta. Arinapoltossa omakäyttösähkön tehontarve on pienempi kuin leijupoltossa. Huonoja puolia ovat hidas säädettävyys, liikkuvien arinarautojen huollontarve ja leijupolttoa epätäydellisempi palaminen, mikä johtuu kaasujen huonommasta sekoittumisesta. Säästöalue on tavallisesti 20–100 % nimellistehosta. (Flyktman ym. 2012, 16.) Arinalla on mahdollista polttaa palakooltaan suurta polttoainetta, mutta arinapoltto on herkkä palakoon vaihteluille. Haittana ovat myös suuri palamiskelpoisen aineen määrä tuhkassa ja korkea ilmakerroin (1,3–1,4). (Blomberg 2005, 39.)

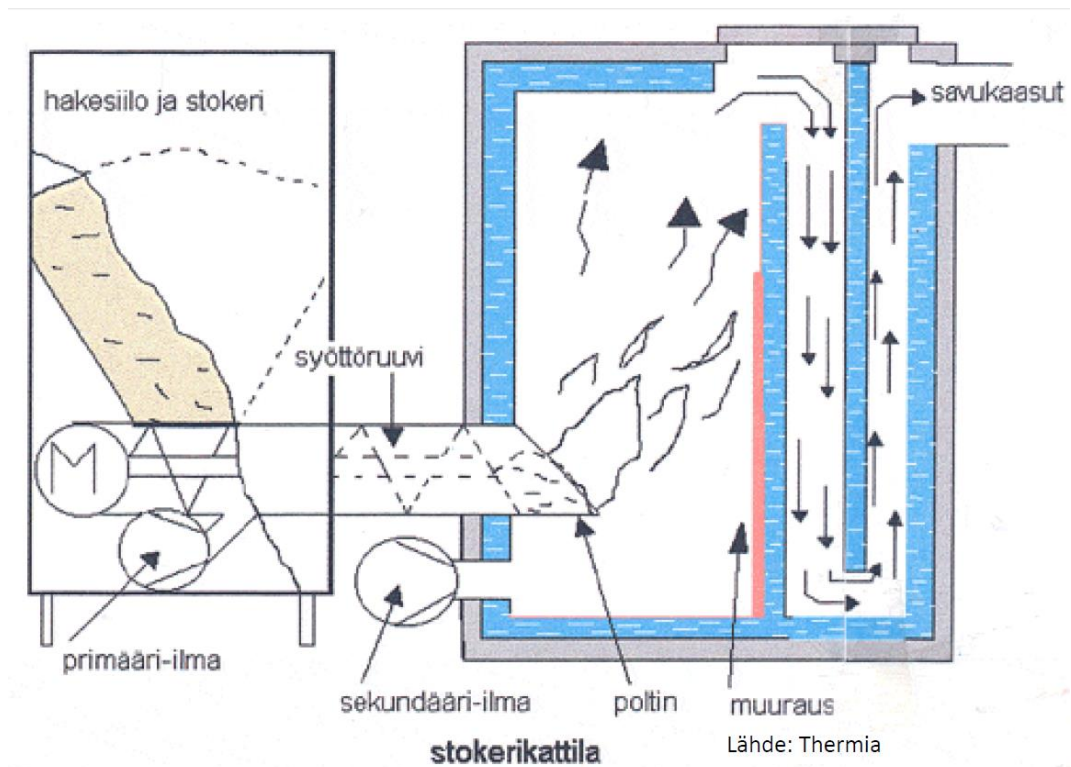
Stokeri on ruuvisyöttöinen arinapoltin. Stokeripolttimia valmistetaan pienkiinteistökokoluokasta, eli noin 20 kW:n tehosta, noin kolmeen megawattiin saakka. Suurilla tehoilla käytetään useita rinnakkaisia polttimia. Näin saadaan laaja tehonsäästöalue sammuttamalla osa polttimista pienen tehontarpeen aikana. Pienintä käytettävissä olevaa tehoa rajoittaa savukaasujen lämpötilan laskeminen liian alhaiseksi. (Flyktman ym. 2012, 17.)

Pääpolttoaineiksi stokeripolttimiin soveltuvat polttimeen mallista riippuen puupelletti, puuhake, laatuluokan A käytetty puu ja palaturve. Laatuluokan A puuhun sisältyy maalaamaton rakennuspuu, vaneritehtaan viilutähde ja puutarhajäte. Kosteus tulisi olla alle 45 % ja palakoko tasaista. (Mts. 10, 18.)

2.3 Kattilatyypit

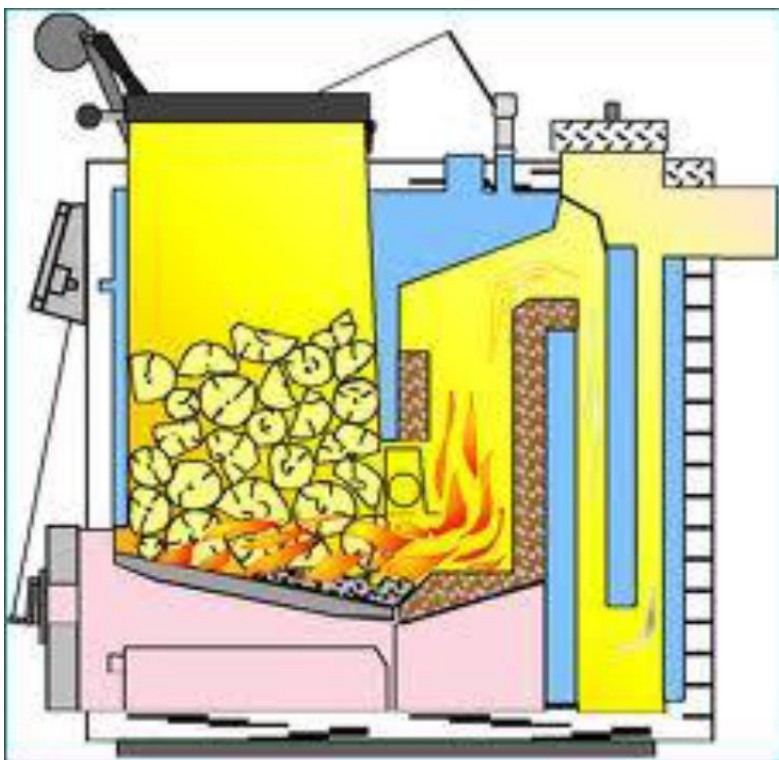
100–1000 kW:n teholuokassa haketta poltetaan yleensä niin sanotussa laatikkokattilassa, joka voi olla ylä- tai alapaloinen. Yläpaloisessa kattilassa hake syötetään yleensä ruuvilla palopäähän (kuvio 5). Palamislämpötila pyritään saamaan korkeaksi ja palamisaika tarpeeksi pitkäksi, että märänkin hakkeen savukaasut ehtivät palaa ennen lämmöntalteenottopinnoille kulkeutumista. Lämpötilaa voidaan kohottaa

vuoraamalla tulipesä tulitiilillä, jotka estävät liekkiä koskettamasta vesijäähdytettyä pintaa, eikä liekki pääse jäähtymään. Muuraukset myös estävät tulipesän seinien syöymistä, jota voi tapahtua poltettaessa märkää haketta. (Airaksinen ym. 2001, 39.)



Kuvio 5. Ruuvisyöttöinen yläpaloinen hakekattila (Vertainen 2014)

Alapalokattilassa syöttö tapahtuu ylhäältä sulkusyöttimen kautta vesivaipan ympäröimään säiliöön, jossa hake kuivuu valuessaan alas kohti arinaa. Arinalla polttoainekerroksen läpi puhalletaan ensiöilmaa, joka saa hakkeen palamaan hääkäaasuksi. Häkä palaa toisioilman vaikutuksesta hiilidioksidiksi. (Ks. kuvio 6.) Toisioilma on usein esilämmitettyä. (Airaksinen ym. 2001, 39.)



Lähde: www.finnbioenergy.fi

Kuvio 6. Alapalokattila (Vertainen 2014)

Laatikkokattilan lisäksi käytössä on tuli- ja vesiputkikattiloita. Tuliputkikattilassa savukaasut virtaavat veden ympäröimissä putkissa. Vesiputkikattila toimii päinvastoin, eli lämmitettävä vesi virtaa putkissa, joiden välissä savukaasut virtaavat. (Airaksinen ym. 2001, 39–40.)

Aluelämpölaitoksissa on käytössä lämmön talteenottojärjestelmiä, joilla polttoaineen sisältämän veden höyrystämiseen käytetty energia saadaan talteen jäähdyttämällä savukaasut alle sadan asteen ennen piippuun johtamista. Näin voidaan tuottaa jopa enemmän energiaa kuin mistä on hakkeen toimittajalle maksettu, sillä hakkeen hinnoittelussa sen kuiva-aineen lämpöarvosta vähennetään veden höyrystämiseen kuluva lämpömäärä. (Mts. 40.)

Kattilasta saatava teho riippuu ensisijaisesti arinan pinta-alasta. Hakkeen poltossa yhdeltä arinan neliömetriltä saadaan tehoa 600–900 kW hakkeen kosteuden ollessa 20–50 %. Tehoon vaikuttavat myös tulipesän tilavuus ja lämmön talteenottopinta-ala.

Tulipesän tulee olla riittävän suuri, että liekki mahtuu tulipesään, ja savukaasujen ja polttoaineen viipymäaika tulipesässä saadaan palamisaikaa pidemmäksi. Puussa on paljon haihtuvia aineita, joten se on pitkäliekkinen polttoaine ja tarvitsee suuren palotilan. Yhden kuutiometrin tulipesä riittää 200–250 kW:n tehon saamiseksi, ja talteenottopintaa tulee olla neliometri 10 kW:n tehoa kohti. (Airaksinen ym. 39; Alakangas 2000, 35; Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 126.)

2.4 Palamisen hallinta

Palamisilman ohjauksella pyritään sekoittamaan oikea määrä palamisilmaa mahdollisimman hyvin palamiskaasujen kanssa ja saavuttamaan tarpeeksi pitkä savukaasujen viipymäaika tulipesässä puhtaan palamisen ja hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi. (Alakangas ym. 2008, 37, 44.)

Palamisilman tarve vaihtelee palamistapahtuman vaiheesta riippuen. Eniten ilmaa tarvitaan pyrolyysituotteiden eli kaasujen palaessa. Toisioilmaa tarvitaan paljon, kun kaasumaiset aineet palavat. Hiilloksen polttamiseen ei toisioilmaa juuri tarvita, koska pyrolyysikaasuja ei synny enää tässä palamisen vaiheessa. (Mts. 37.)

Savupiipusta nouseva tumma savu on merkki epätäydellisestä palamisesta. Se johtuu yleensä liian nopeasta kaasuuntumisesta, jolloin toisioilma ei riitä kaasujen polttamiseen. Liekin kohistessa savukanavissa on ilman virtaus liian suuri. (Mts. 37.)

Palamisen puhtaudesta kertoo ensisijaisesti savukaasujen häkäpitoisuus. Lukuun ottamatta typen oksidien päästöjä, häkäpitoisuuden pienentäminen vähentää muita haitallisia päästöjä. (Flyktman ym. 2012, 33.) Savukaasujen häkä- ja happipitoisuuden perusteella säädetään toisioilman määrää. Ensiöilmaa säädetään tehontarpeen mukaan. (Mts. 27.) Palamiskelpoisen kaasun (CO) määrä poistuvissa savukaasuissa vaikuttaa myös kattilan hyötysuhteeseen, mutta vaikutus on melko pieni matalilla häkäpitoisuuksilla. Noin 2000 ppm:n CO-pitoisuus alentaa hyötysuhdetta noin yhden prosenttiyksikön. (Mts. 35–36.)

Pienissä kattiloissa täytyy häkäpitoisuuden alentamiseksi nostaa ilmakerrointa, mikä usein laskee hyötysuhdetta enemmän kuin CO-päästön vähentäminen sitä nostaa. Alle 5 MW:n kattiloissa häkäpitoisuuden hallinta on kuitenkin tärkein päästöihin vaikuttava tekijä. Siinä on edistytty huomattavasti ottamalla käyttöön taajuusmuuttajat puhaltimien ja polttoaineen syötön ohjaamisessa. Suurissa laitoksissa voidaan häkäpitoisuutta pienentää nostamatta ilmakerrointa merkittävästi. (Mts. 33.)

Palamisen hyvyttä arvioitaessa on otettava huomioon palamattoman polttoaineen määrä arina- ja lentotuhkassa. VTT:n laatimassa suosituksessa (mts. 34) tavoite palamiskelpoisen aineen massaosuudeksi arina- ja stokeripoltossa haketta poltettaessa on alle 50 % arinatuhkassa ja lentotuhkassa saman verran.

Palamisen hallintaan liittyvään automaatioon suositellaan 0,5-5 MW:n laitoksilla sisältyvän seuraavaa:

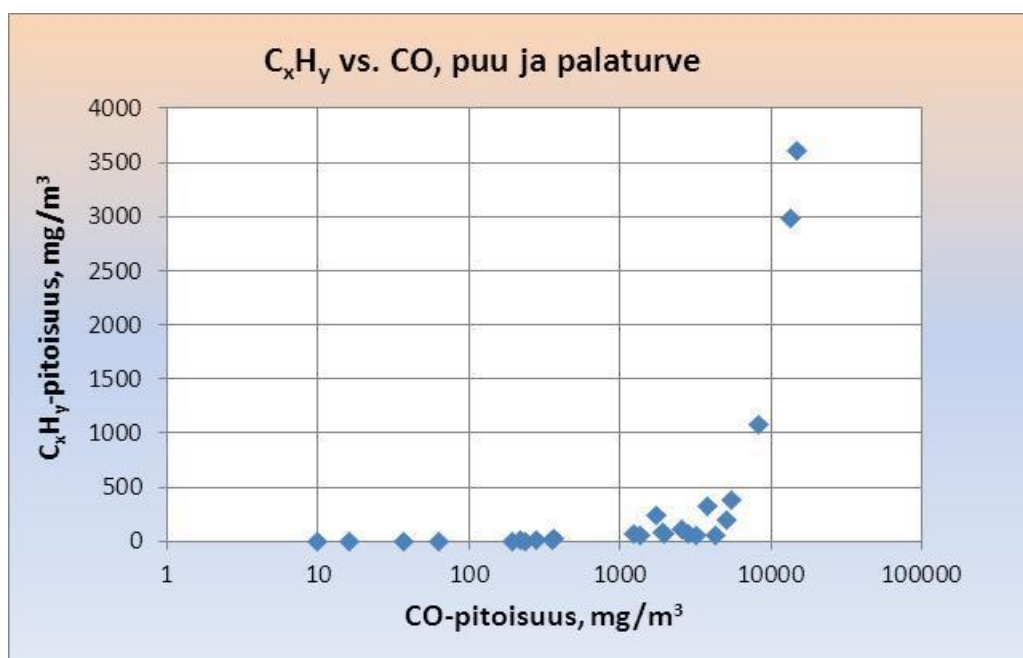
- Polttoaineen syötön ja puhaltimien portaaton säätö (taajuusmuuttaja)
- Savukaasujen lämpötilan ja jäännöshapen mittaus
 - Savukaasujen lämpötilan ja happipitoisuuden nousu laskevat hyötysuhdetta, mutta lämpötilan tulee kuitenkin olla riittävän korkea, että rikkihappoa ei tiivisty savukanaviin.
- Ensiöilma säädetään tehontarpeen ja toisioilma jäännöshapen mukaan
 - Erilliset puhaltimet ensiö- ja toisioilmalle
- Tulipesän lämpötilan mittaus ja säätö (tavallisesti savukaasujen takaisinkierätyksellä ja ilman vaiheistuksella)
 - Hallitaan NO_x ja CO-päästöjä.
- Tulipesän alipaineen mittaus ja säätö
 - Alipainetta säädetään savukaasupuhaltimella. Liian pieni alipaine voi aiheuttaa takapalon.
- Palamisen puhtaus
 - Palamisen puhtauteen vaikutetaan säätämällä tulipesän lämpötilaa ja jäännöshapen pitoisuutta.
 - Puhtautta valvotaan savukaasun häkäpitoisuuden mittauksella, joka on velvoite yli 5 MW:n kattiloissa. Häkäpitoisuuden tulee olla korkeintaan 1000 mg/m³. (Mts. 33, 37–38.)

2.5 Päästöt

Häkä (CO)

Häkäpitoisuus kuvaa palamisen puhtautta ja on yhteydessä muiden päästöjen määrään. Sitä seurataan lähinnä säätöjen tekemistä varten ja vasta toissijaisesti päästösuureena. Häkäpitoisuuden kasvaessa suureksi lisääntyvät typpioksiduulin (N_2O) ja hiilivetyjen päästöt jyrkästi. Vaikutus NO_x -päästöihin on erisuuntainen ja lievempi. (Flyktman ym. 2012, 5.)

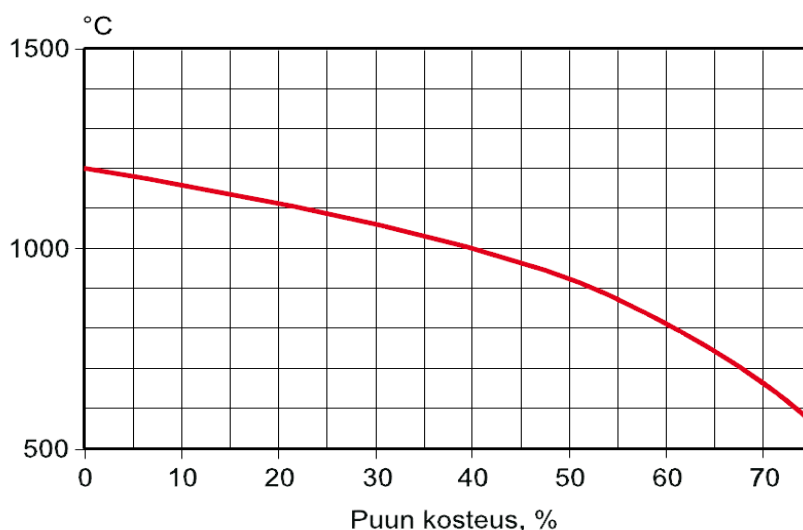
Häkäpitoisuus on eniten päästöihin suoraan vaikuttava säätösuure. Kuviossa 7 näkyy kuinka hiilivetypäästö kasvaa nopeasti häkäpitoisuuden ylittäessä kynnsarvon. Häkäpitoisuuden pysyessä matalana, ovat vastaavasti muutkin terveydelle haitalliset päästöt vähäisiä. Häkäpitoisuus vaikuttaa muun muassa PAH-yhdisteiden määrään ja pienhiukkasten koostumukseen. (Mts. 26–27.) PAH-yhdisteet, eli polysykliset aromaattiset hiilivedyt, ovat vaarallisimpia ilmansaasteita, koska monet niistä ovat syöpää aiheuttavia (Ilmanlaatuportaali n.d.).



Kuvio 7. Hiilivetypäästö kasvaa jyrkästi, kun häkäpitoisuus ylittää kynnsarvon. Pitoisuudet on redusoitu kuivaan savukaasuun 6 % happipitoisuudessa. (Flyktman ym. 2012, 27.)

Riittävän korkea palamislämpötila ja ilman sekoittuminen palokaasuihin ovat tärkeimmät tekijät häkäpitoisuuden hallinnassa. Tulipesän lämpötilaa voidaan muuttaa savukaasujen takaisinkiertäystä ohjaamalla. Muurauksilla voidaan nostaa ja vakauttaa tulipesän lämpötilaa. Tulipesän seinämien lämpötilaan voidaan vaikuttaa materiaalin lisäksi mitoituksella. Polttoaineen laadulla on suuri vaikutus päästöihin ja hyötysuhteeseen. Sen merkitys on sitä suurempi, mitä pienempi kattila on kyseessä. Polttoaineessa tulee kiinnittää huomiota kosteuteen ja palakokoon sekä määrään ja sijoittumiseen tulipesässä. (Alakangas ym. 2008, 44; Flyktman ym. 2012, 27.)

Kuviossa 8 näkyy puun kosteuden vaikutus liekin lämpötilaan.



Kuvio 8. Puun kosteuden vaikutus liekin lämpötilaan (Alakangas 2008,42).

Alle 5 MW:n laitoksissa CO-päästöt vaihtelevat paljon. Hetkelliset pitoisuudet ovat välillä 20...10 000 mg/m³. Polttoaineen laatuvaihtelut vaikeuttavat polttoaineen tasaista syöttöä ja, aiheuttavat siten piikkejä häkäpitoisuudessa. Hyvin toimivien kattiloiden savukaasujen CO-pitoisuus alittaa 500 mg/m³. (Flyktman ym. 2012, 28.)

Alle 5 MW:n teholuokassa tärkeintä on päästöjen terveys- ja viihtyvyyshaittojen vähentäminen. Olennaista on tällöin keskittyä hiukkaspäästöjen rajoittamiseen. (Mts. 27.)

Hiukkaspäästöt

Hiukkaspäästöjen määrään vaikuttavat polttoaine sekä poltto- ja puhdistustekniikka. Puun polton lentotuhkasta suuri osa on pienhiukkasia, joiden halkaisija on alle 2,5 µm, ja niistä valtaosa on läpimitaltaan 0,1...1,0 µm:n kertymähiukkasia. Pienhiukkasten poisto savukaasuista on vaikeampaa kuin karkeiden hiukkasten. (Mts. 6-7.) Puun ja turpeen stokeri- ja arinapoltossa 0,5-5 MW:n teholuokassa on syklonierotin toimiva perusratkaisu hiukkasten poistoon. 5-10 MW:n teholuokassa erottimeksi sopii multisykloni, tarpeen mukaan myös sähkösuodatin, riippuen tuhkan määrästä ja lentopölyn hiukkaskoosta. (Mts. 29.)

Typen oksidit (NO_x)

Typen oksidien päästöihin vaikuttavat polttoaineen kosteus ja typpipitoisuus sekä palamiskaasujen lämpötilan ja happipitoisuuden jakautuminen tulipesässä. Alle 30 MW:n teholuokassa päästöjä voidaan vähentää palamisilman vaiheistuksella ja savukaasujen takaisinkierrätyksellä. Vanhat arinakattilat ovat hankalimpia hallittavia. NO_x-päästöt ovat puupolttoaineilla pienemmät kuin turpeella. (Mts. 28.) Typen oksidien päästöjen vähentämiseen riittää palamisilman vaiheistaminen stokeri- ja arinapoltossa 0,5-10 MW:n tehoilla (mts. 29).

Rikkidioksidi (SO₂)

Rikkidioksidipäästöihin vaikuttaa eniten polttoaineen rikkipitoisuus. Tuhkan kalium, natrium ja kalsium vähentävät SO₂-päästöjä, koska ne sitovat rikkiä tuhkaan. Puun polton rikkidioksidipäästöt ovat vähäisiä, sillä puun rikkipitoisuus on pieni ja tuhkassa on paljon kaliumia ja kalsiumia. (Mts. 28.)

Poltettaessa puuta seospolttoaineena turpeen kanssa, saadaan turpeen SO₂-päästöä vähennettyä huomattavasti. Myös puun poltossa syntyvien pienhiukkasten määrä vähenee. Menetelmän puutteena on, että rikkidioksidin ja pienhiukkasten erotusastetta ei voida tarkasti arvioida puun ja turpeen seossuhteesta. (Mts. 7.)

2.6 Palamisilman tarve

Palamiseen tarvittavan ilman ja syntyvien savukaasujen määrä voidaan laskea polttoaineen koostumuksen ja palamisreaktioiden perusteella. Polttoaineen palavia, hapen kanssa reagoivia, komponentteja ovat hiili, vety ja rikki. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 83.)

Hiilen palaminen tapahtuu reaktioyhtälön 1 mukaisesti.



Yhtälö tarkoittaa, että yksi mooli hiiltä tarvitsee täydelliseen palamiseen yhden moolin happea ja lopputuotteena on yksi mooli hiilidioksidia. Jos palaminen ei ole täydellistä, syntyy hiilimonoksidia CO. (Mts. 84.)

Vedyn palamista kuvaa reaktioyhtälö 2.



Kahden vetymoolin palamiseen tarvitaan siis yksi mooli happea, joista syntyy kaksi moolia vettä. Vedyn palamistuotteena syntyy vain vesihöyryä, joten paljon vetyä sisältävät polttoaineet ovat ympäristön kannalta hyviä. (Mts. 84.)

Rikin palamisen reaktioyhtälö on yhtälö 3.



Rikin palaessa muodostuu rikkidioksidia, josta yleensä osa hapettuu rikkiatrioksidiksi, josta vielä savukaasuissa olevan veden kanssa syntyy rikkihappoa. Rikki on haitallista sekä ympäristölle että kattilalle. (Mts. 84.)

Nämä reaktioyhtälöt kuvaavat ainoastaan palamisen nettoreaktioita eli niissä on esitetty vain lähtöaineet ja lopputuotteet. Todellisuudessa reaktiot ovat monimutkaisempia, mutta nettoreaktioyhtälöstä saadaan riittävät tiedot palamisilmantarpeen laskentaan. Edellä mainittujen aineiden lisäksi myös polttoaineen sisältämä typpi saattaa reagoida hapen kanssa muodostaen ympäristölle haitallisia typpioksideja. Polttoaineen happi, jota puupolttoaineissa on runsaasti, vähentää palamisilman tarvetta. (Mts. 83–84.)

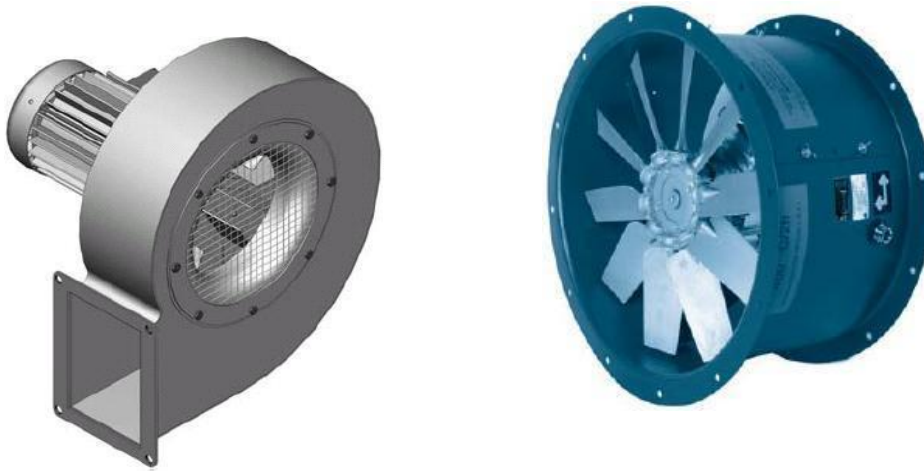
Reaktioyhtälöissä on alkuaineiden määrät kuvattu mooleina, joten ilmantarpeen laskentaa varten täytyy polttoaineen koostumus muuttaa mooleiksi polttoainekiloa kohden jakamalla kunkin alkuaineen paino sen molekyylipainolla. Teoreettinen palamisen hapentarve saadaan laskemalla yhteen hiilen, vedyn ja rikin hapentarve ja vähentämällä siitä polttoaineessa oleva happi. (Mts. 85.)

Ilmassa on hapen lisäksi myös muita kaasuja, joten ilmantarpeen saamiseksi täytyy tarvittava happimäärä jakaa luvulla 0,21, joka on hapen osuus ilman tilavuudesta. Näin on laskettu teoreettinen kuivan ilman tarve mooleina, jotka voidaan muuttaa massayksiköiksi ilman molekyylipainolla kertomalla, tai tilavuusyksiköiksi moolitilavuudella kertomalla. Ilmassa on kuitenkin aina kosteutta, eli siinä on kuivan ilman lisäksi vesihöyryä. Kosteus lisää ilmamäärää vain 0,1–1,0 %, joten sitä ei yleensä tarvitse huomioida. (Mts. 85–86.)

Teoreettinen ilmamäärä ei käytännössä riitä täydelliseen palamiseen. Käytetyn ilmamäärän suhdetta teoreettiseen ilmamäärään sanotaan ilmakertoimeksi. Ilmakertoimen suuruus riippuu polttoaineen ominaisuuksista; kiinteän ja vaikeammin poltettavan polttoaineen polttamiseen tarvitaan suurempi ilmakerroin kuin nestemäisellä tai kaasumaisella polttoaineella. (Mts. 86.)

3 Puhaltimet

Puhallin voi olla malliltaan aksiaalipuhallin, jossa kaasu virtaa akselin suuntaisesti, tai keskipakopuhallin, jossa virtaussuunta on ensin akselin suuntainen, mutta kääntyy säteen suuntaiseksi (kuvio 9). Puhaltimissa painesuhde on niin pieni, usein alle 1,1, että kaasun tiheys ei käytännöllisesti katsoen muutu. (Wiksten 2009, 177–178.)



Kuvio 9. Vasemmalla keskipakopuhallin ja oikealla aksiaalipuhallin (Kokko Control n.d.)

3.1 Keskipakopuhallin

Keskipakopuhaltimia käytetään tarvittaessa korkeita puhalluspaineita. Puhaltimen imuaukko on akselin ympärillä ja kaasu poistuu juoksupyörän ulkoreunalta. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 245.)

Puhaltimissa käytetään erilaisia siipimalleja olosuhteiden mukaan. Yleisin keskipakopuhaltimien siipimuoto on taaksepäin kaartuva, koska sillä saadaan paras

hyötysuhde. Tätä siipimallia käytetään kuljetettaessa puhdasta kaasua. (Huhtinen ym. 2000, 245; Wiksten 2009, 184.)

Suorasiipistä juoksupyörää käytetään pölyisen kaasun puhaltamiseen, sillä se pysyy puhtaana kaartuvasiipistä paremmin. Eteenpäin kaartuvia siipiä käytetään silloin, kun ei tarvita suurta staattisen paineen nostoa. Tässä mallissa imuaukko on suuri, joten voidaan käsitellä suurta ilmamäärää. (Wiksten 2009, 184.)

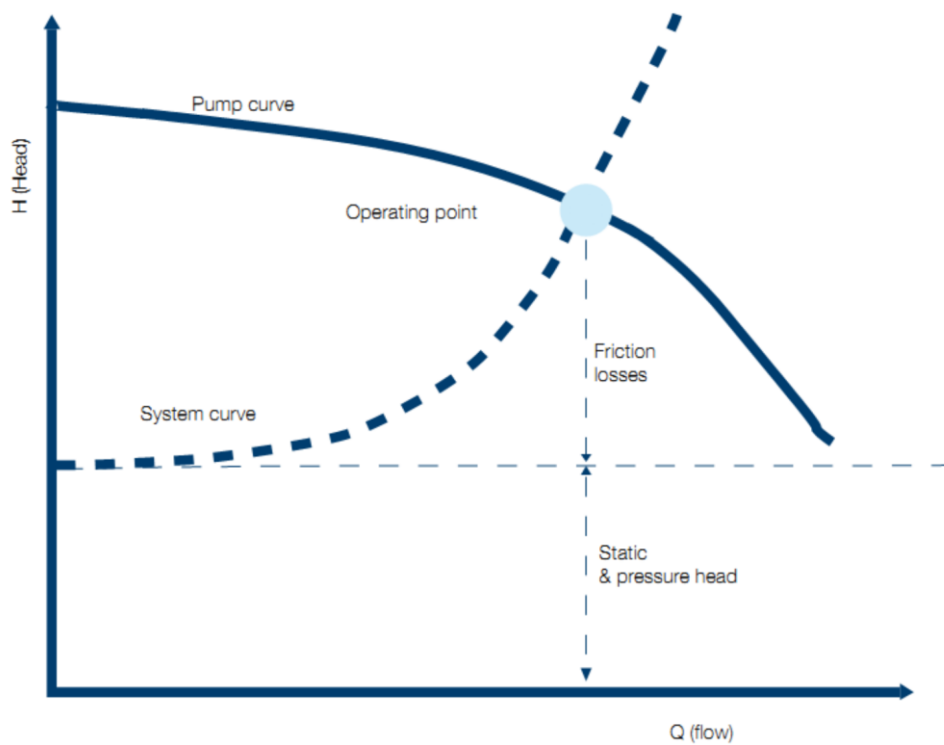
Savukaasupuhaltimissa voidaan siipien kulumista vähentää niiden poistokulmaa suurentamalla, jolloin tarvittava kierrosnopeus on pienempi. Kulumista hidastaa myös virtausnopeuden pitäminen pienenä. (Huhtinen ym. 2000, 245.)

3.2 Kierrosnopeuden vaikutus

Sekä keskipako- että aksiaalipuhaltimen tuottama tilavuusvirta on suoraan verrannollinen kierrosnopeuteen. Kokonaispaine-ero on suoraan verrannollinen kierrosnopeuden neliöön ja akseliteho kuutioon. (Wiksten 2009, 202.)

Jos puhallin on liitetty kanavaan, myös kanavaverkoston ominaisuudet vaikuttavat toimintapisteeseen, eli kokonaispaine-eroon ja tilavuusvirtaan. (Mts. 207.)

Verkoston staattisen painehäviön riippuvuutta tilavuusvirrasta kuvaa verkoston ominaiskäyrä, joka on painehäviö-tilavuusvirta -koordinaatistossa nouseva paraabeli. Puhaltimen kokonaispaine-eron riippuvuus tilavuusvirrasta määritetään kokeellisesti, ja näin saadaan puhaltimen ominaiskäyrä, joka koskee juoksupyörän ja vaipan muodostamaa kokonaisuutta. Puhaltimen tilavuusvirta ja vastaava paine-ero voidaan lukea ominaiskäyrien leikkauspisteestä, jota kutsutaan toimintapisteeksi (kuvio 10). (Mts. 192, 207.)



Kuvio 10. Ehyt viiva on puhaltimen tai pumpun ominaiskäyrä ja katkoviiva verkoston ominaiskäyrä (Isometsä 2013, 19).

3.3 Tilavuusvirran säätö

Kun halutaan muuttaa puhaltimeen liitetyn verkoston tilavuusvirtaa, voidaan tämä tehdä joko muuttamalla pumpun ominaiskäyrää tai verkoston vastusta. Verkoston vastukseen voidaan vaikuttaa säätöventtiiliä säätämällä eli kuristussäädöllä. Kuristussäätö on energiankulutuksen kannalta huono säätötapa, koska puhallin ei tällöin toimi suunnittelupisteessään. Tässä pisteessä ilman nopeus, juoksupyörän kehänopeudet ja siipikulmat ovat sellaiset, että hyötysuhde on suurimmillaan. Kuristussäätöä käytettäessä syntyy sysäyshäviöitä ja hyötysuhde huononee. Säätöventtiilin aiheuttaman painehäviön voittamiseen kuluva teho menee hukkaan. (Huhtinen ym. 2000, 244; Wiksten 2009, 220.)

Puhaltimen ominaiskäyrää voidaan muuttaa säädettävillä johdesiivistöillä keskipakopuhaltimen imuaukon edessä, juoksupyörän kierrosnopeutta muuttamalla tai aksiaalipuhaltimen juoksupyörän siipikulmia säätämällä (Wiksten 2009, 220).

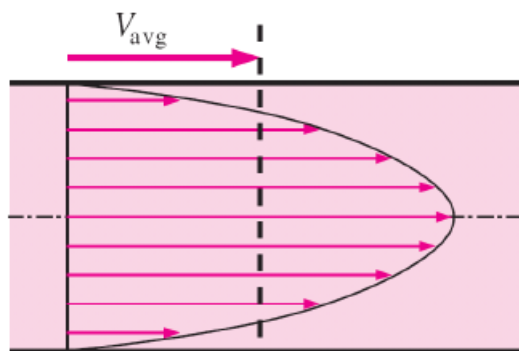
Johdesiipisäädössä kaasulle annetaan siipipyörän suuntainen pyörimisliike, joka pienentää tilavuusvirtaa. Myös tehontarve pienenee, joten johdesiipisäädöllä saavutetaan kuristussäätöä parempi hyötysuhde, mutta sitä käytetään yleensä vain siipien ollessa taaksepäin kaartuvat. Myös aksiaalipuhaltimen siipikulmien säädöllä hyötysuhde säilyy korkeana. (Huhtinen ym. 2000, 244; Wiksten 2009, 221.)

Kierrosnopeussäädössä sähkömoottorin kierrosnopeutta muutetaan taajuusmuuttajalla. Tilavuusvirta muuttuu samassa suhteessa kierrosnopeuden kanssa. Hyötysuhde on hyvä, sillä puhallin toimii suunnittelupisteessä. (Wiksten 2009, 222.)

4 Ilman virtaus ja sen mittaaminen

4.1 Ilman virtaus putkessa

Kitkan vaikutuksesta virtausnopeus on tavallisesti pienempi putken reunoilla kuin keskellä (kuvio 11). Virtausnopeusprofiilin muoto riippuu muun muassa virtausnopeudesta ja aineen viskositeetista. Sen muutokset aiheuttavat mittausvirhettä nopeutta mitattaessa. Mittausten kannalta erityisen vaikea tapaus on epäsymmetrinen profiili, jollainen voi esiintyä esimerkiksi putken mutkassa, jossa virtausnopeus on suurin ulkokaarten puolella. Myös virtauksen pyörteisyys voi haitata mittausta. Virtausesteet kuten mutkat, venttiilit ja anturit voivat aiheuttaa pyörteitä. (Pihkala 2004, 60.)



Kuvio 11. Virtausnopeusprofiili putkessa (Isometsä 2013, 8)

Suorassa, poikkipinta-alaltaan ja muodoltaan muuttumattomassa putkessa painehäviö johtuu kitkasta, jota syntyy eri ilmakerroksien liikkeessa toisiinsa nähden. Putken seinämän epätasaisuudet aiheuttavat pyörteilyä ja kitkaa. Kitkan suuruuteen vaikuttavat ilman nopeus ja virtaustekniset ominaisuudet, kuten viskositeetti ja tiheys. Nopeus vaikuttaa siten, että pyörteily voimistuu virtausnopeuden kasvaessa. Putkilaajennuksissa, haarautumisissa ja venttiileissä voi myös esiintyä pyörteilyä, joka painehäviötä laskettaessa huomioidaan kullekin kertavastukselle ominaisella kertavastuskertoimella. (Wiksten 2009, 206.) Virtausnopeuden kasvaessa virtaus muuttuu vähitellen laminaarisesta turbulenttiseksi. Turbulenttisen virtauksen painehäviö on laminaarista suurempi, koska energiaa kuluu enemmän kitkan voittamiseen. (Valtanen 2009, 224.)

4.2 Virtauksen mittaaminen

Virtausta voidaan mitata joko tilavuus- tai massavirtauksena. Jos kaasun virtaus ilmoitetaan tilavuusvirtana, täytyy kaasun paine ja lämpötila olla tiedossa. Tilavuusvirta lasketaan virtausnopeuden perusteella kertomalla nopeus putken poikkipinta-alalla. Massavirtaus saadaan, kun tilavuusvirta kerrotaan aineen tiheydellä. (Pihkala 2004, 59.)

Pyörteiden ja virtausprofiilin tasoittumiseksi anturit täytyy usein sijoittaa sellaiseen paikkaan, jossa on riittävän pitkä suora putkiosuus anturia ennen ja sen jälkeen, tai putkeen voidaan asentaa virtauksen oikaisija. (Pihkala 2004, 60.)

Jos mittaus edellyttää virtauksen johtamista anturin läpi, saattaa se aiheuttaa painehäviötä. Tämä kannattaa huomioida antureita valittaessa, jos virtaukset ovat suuria tai niitä on useita. Virtaus on mahdollista myös laskea tietokoneella esimerkiksi pumpun ominaiskäyrän ja pyörimisnopeuden perusteella. (Mts. 60–61.)

Kaasun virtauksen mittaamiseen käytettäviä menetelmiä ovat muun muassa paine-eroon perustuvat mittarit, kuten pitot-putki, venturiputki ja putkimutkamittaus tai pyörteilyn taajuuteen perustuva pyörreanamittaus (Huhtinen ym. 2000, 279–282).

4.3 Pitot-putki

Pitot-putki koostuu kahdesta sisäkkäisestä putkesta. Putken mittauspää on taivutettu varren kanssa suoraan kulmaan. Mittauspään keskellä on reikä, joka on sisäputken kautta yhteydessä letkunliittimeen. Lähellä mittauspäättä, kohtisuorassa putken pintaa vastaan, olevat reiät ovat ulkoputken kautta yhteydessä toiseen liittimeen. (SFS-5147, 1986, 38.)

Mittauspää suunnataan virtausta vastaan, jolloin putken sivuaukkoihin vaikuttaa virtaavan kaasun staattinen paine. Putken päässä olevaan reikään vaikuttaa staattisen paineen lisäksi myös virtaavan kaasun liike-energian aiheuttama dynaaminen paine. Kun molemmat liittimet yhdistetään paine-eromittariin, mittari mittaa dynaamisen paineen. (SFS-5147, 1986, 38.) Virtauksen nopeus määritetään dynaamisen paineen ja kaasun tiheyden avulla (Päästömittausten käsikirja 2007, 13). Se lasketaan yhtälöllä 1.

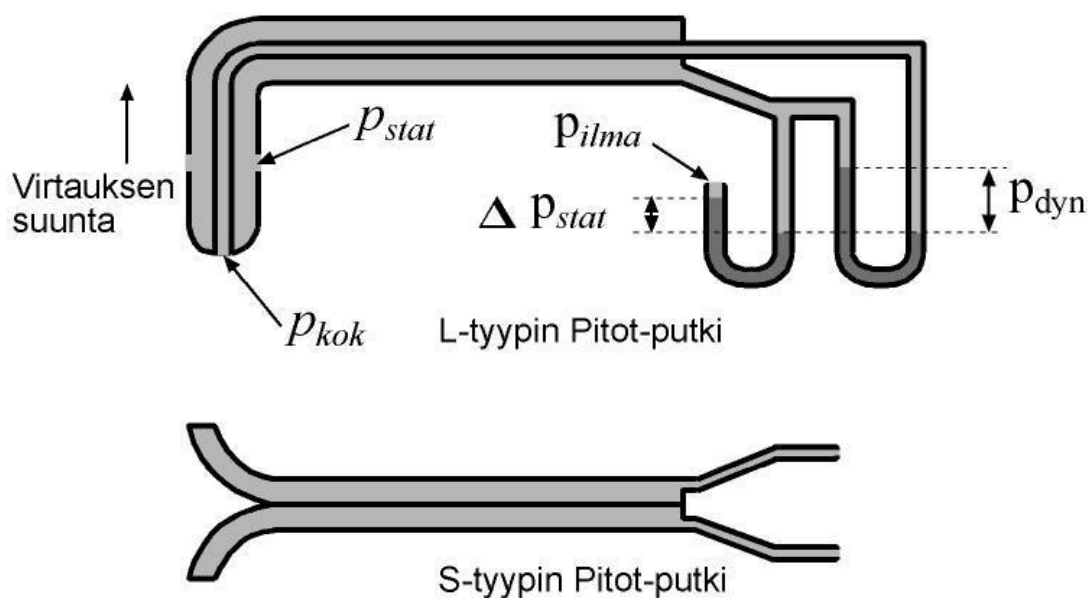
$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

missä v = virtaavan kaasun nopeus

Δp = kokonaispaineen ja staattisen paineen ero eli dynaaminen paine

ρ = virtaavan kaasun tiheys (Valtanen 2009, 223).

Pitot-putkia on L- ja S-tyyppisiä. L-tyypin putkea voidaan tukkeutumisvaaran vuoksi käyttää vain, kun kaasu on kuivaa ja hiukkaspitoisuus on pieni. S-tyypin putki sen sijaan sopii myös kosteille ja runsaasti hiukkasia sisältäville kaasuille. (Päästömittausten käsikirja 2007, 13.) Kuviossa 12 esitetään pitot-putkityypit ja niiden mittauseriaate.



P_{kok} = kokonaispaine
 P_{stat} = staattinen paine
 p_{stat} = kanavan staattisen paineen ja ilmanpaineen erotus
 p_{dyn} = dynaaminen paine
 p_{ilma} = ilmanpaine

Kuvio 12. L- ja S-tyypin pitot-putket (Päästömittausten käsikirja 2007, 14)

Pitot-putken suuaukko tulee suunnata mahdollisimman tarkasti virtausta vastaan, sillä putken suunnan poikkeama virtauksen suunnasta aiheuttaa mittaukseen epävarmuutta. L-tyypin putkea on hyvä käyttää tarkkuutensa vuoksi aina kun se on mahdollista, eli

mitattava kaasu on riittävän kuivaa ja hiukkaspitoisuus on pieni. S-tyypin putkea käytettäessä on huomioitava, että sitä ei saa viedä liian lähelle kanavan seinämää, sillä seinämä aiheuttaa häiriötä. Mahdollisten kolhujen tai kertyneiden epäpuhtauksien takia putket tulisi huoltaa ja kalibroida säännöllisesti. (Päästömittausten käsikirja 2007, 14; SFS-13284-1, 2005, 27.)

4.4 Annubar-putki

Annubar-putki on pitot-putken sovellus. Siinä on virtausta vastaan neljä reikää, joiden kautta putken sisälle syntyy keskimääräistä virtausnopeutta vastaava kokonaispaine. Staattinen paine mitataan putken takapuolelta. Annubar-putki on kohtalaisen tarkka, ja tehohäviöt ovat pienet. Virtausprofiilin muutokset eivät juuri vaikuta mittaustarkkuuteen, mutta pyörteisyyden poistamiseksi tarvitaan suora putkiosuus ennen anturia. Annubar-putki soveltuu kaasuille, höyryille ja nesteille. (Pihkala 2004. s.73.) Kuviossa 13 on työssä käytetty annubar-putki.



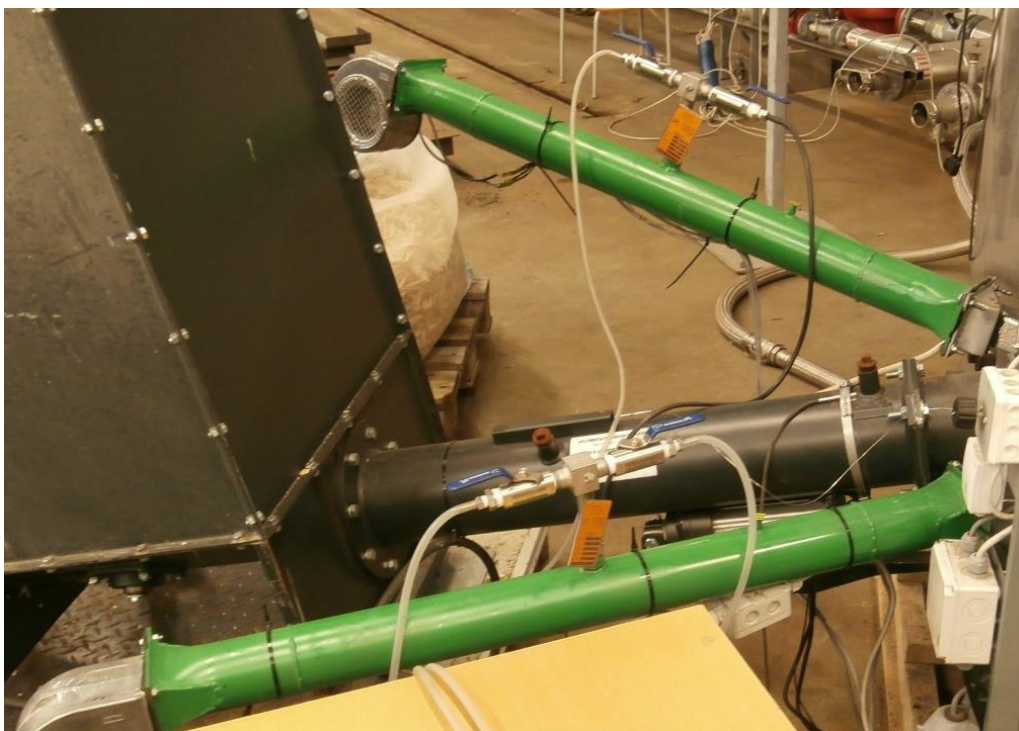
Kuvio 13. Annubar-putki

4.5 Mittausten suunnittelu

Mittauksissa ja niiden valmisteluissa sovellettiin standardia SFS-EN 13284-1, joka käsittelee päästömittausten tekemistä ja niihin liittyvää virtauksen mittausta. Standardin mukaan halkaisijaltaan alle 0,35 m:n kanaville riittää yksi mittauspiste. Mittaustason tulisi sijaita kanavan suoralla osalla, jossa kanavan muoto ja poikkipinta-ala eivät muutu. (SFS-EN 13284-1, 2002, 8-9.)

Mittaukset tulisi tehdä riittävän kaukana ennen ja jälkeen mittauskohtaa sijaitsevista, virtausta häiritsevistä kanavan osista, kuten mutkista, puhaltimista ja sulkupelleistä. Häiriöttömäksi etäisyydeksi suositellaan viisi kertaa hydraulinen halkisija ennen mittaustasoa ja kaksi kertaa sen jälkeen tai viisi kertaa ennen kanavan päätä. Hydraulinen halkisija d_h on 4 kertaa poikkileikkauksen pinta-ala jaettuna poikkileikkauksen piirillä. (Mts. 6, 8, 9.) Mittauskanavan hydraulinen halkisija on 71 mm, eli mittauskohdan tulee sijaita vähintään 355 mm puhaltimen jälkeen ja saman verran ennen kanavan päätä. Mittauskohta näkyy kuviossa 14, jossa anturit ovat liitettyinä mittausputkiin.

Kanavan lämpötila ja paine tulee standardin mukaan mitata siten, että kaasun todellinen tiheys voidaan laskea $\pm 0,05 \text{ kg/m}^3$ epävarmuudella (mts. 10). Ilman tiheys otettiin huomioon syöttämällä virtausmittareihin hallin lämpötila ja normaali ilmanpaine.



Kuvio 14. Anturit mittausputkissa

Päästömittausten käsikirja (2007, 14) suosittelee, että yhtä pistettä on mitattava riittävän kauan keskiarvon selvittämiseksi, koska paine-eromittarin lukema saattaa vaihdella huomattavasti kussakin mittauspisteessä. Virtausnopeuden vaihtelu oli kuitenkin pientä, joten kymmenen sekunnin pituinen mittausjakso todettiin riittäväksi kun polttimessa ei ollut tulta. Tulokset ovat siis keskiarvoja kymmenen sekunnin ajalta. Paine-eromittarit laskivat keskiarvon niihin asetetun mittausjakson ajalta. Polttokokeissa käytettiin kahdenkymmenen sekunnin mittausjaksoa. Mittaustuloksia kirjattiin kolme kertaa jokaisen polttokokeen aikana ja näistä laskettiin keskiarvo.

Pitot-putken ja annubar-putkien antaman paine-eron mittaamiseen käytettiin paine-eromittareita Kimo MP 200 ja TSI DP-Calc 5825 (kuvio 15). Kimossa oli mahdollisuus valita pitot-putkelle L- tai S-tyypin asetus. Annubar-putkella käytettiin S-tyypin asetusta. Mittarit laskivat paine-eron perusteella virtausnopeuden ja tilavuusvirran. TSI DP-Calc -mittarissa ei ollut S-tyypin asetusta, joten sen antamat tulokset korjattiin laskemalla mittarien antamien arvojen välinen suhde.



Kuvio 15. Paine-eromittarit

5 Mittausten toteutus ja tulokset

5.1 Laitteiston esittely

Laitteistoon kuuluu Ariterm Oy:n 40 kW:n BioComp bioenergiakattila ja MultiJet biopoltin (kuviot 16 ja 17). Poltin on ilmajäähdytteinen, liikkuva porrassarina. Liikkuva arina sekoittaa polttoainetta arinapinnoilla ja parantaa tuhkan siirtymistä palopäästä tuhkatilaan, mikä on tärkeää etenkin runsastuhkaisia polttoaineita poltettaessa. Arinaa liikuttaa karamoottori, isoissa polttimissa hydraulikka. Polttimelle soveltuvia polttoaineita ovat muun muassa puuhake, puu- ja turvepelletti, palaturve ja peltopolttoaineet. (Ariterm 2014, 11; Ariterm 2011.)



Kuvio 16. Multijet-poltin (Ariterm 2015)

Polttoaine syötetään polttimelle poltinruuvilla 400 litran säiliöstä. Palamisilmaa puhalletaan kahdella palamisilmapuhaltimella. Ensiö- ja toisioilmalle on siis erilliset puhaltimet. Tulipesän alipainetta säädetään savukaasupuhaltimella. (Ariterm 2011.) Savukaasun koostumusta ja lämpötilaa seurattiin laboratorion savukaasuanalysaattorilla.

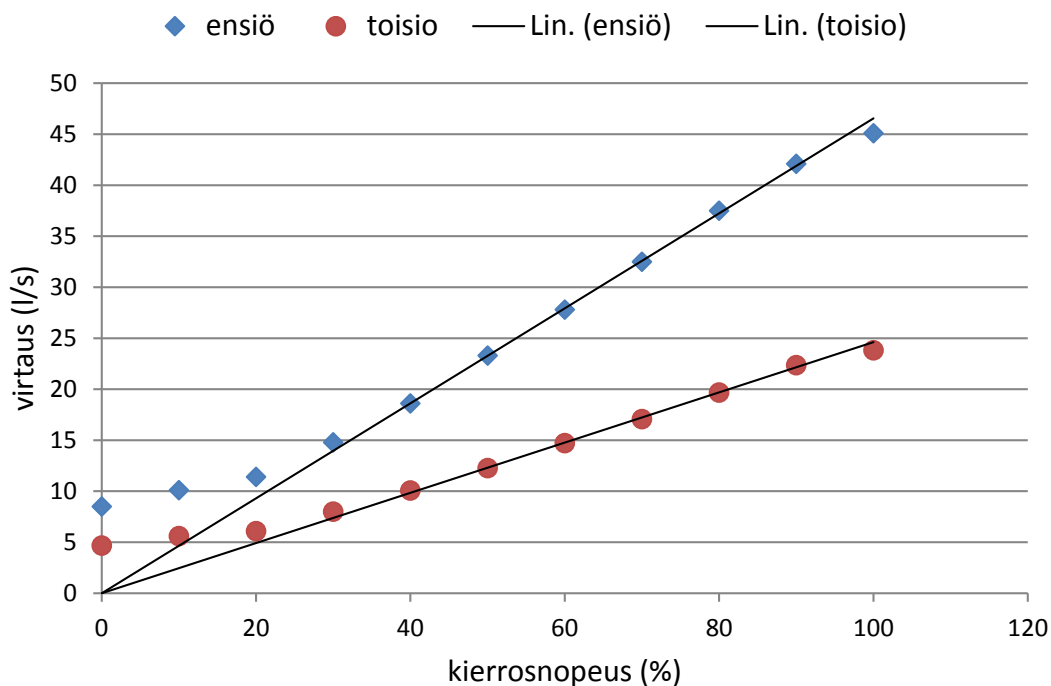
Laitteiden toimintaa ohjaa Arimatic 151-ohjauskeskus. Se ohjaa syöttö- ja polttolaitteita tehontarpeen mukaan, kattila-anturin ohjaamana. Ohjauskeskukseen on myös kytketty varolaitteet, joita ovat kattilaveden lämpötilan rajoitintermostaatti, takapalotermostaatti ja savukaasun lämpötilaan perustuva polttimen liekinvalvonta. (Ariterm 2011.)



Kuvio 17. Kattila ja polttoainesäiliö

5.2 Pyörimisnopeuden ja tilavuusvirran vastaavuus

Ensimmäisenä tavoitteena oli etsiä vastaavuus puhaltimien pyörimisnopeuden ja polttimelle menevän ilmamäärän välille. Tämä selvitettiin mittaamalla ensiö- ja toisioilman tilavuusvirta muuttamalla puhaltimien kierrosnopeutta kymmenen prosentin välein. Tulipesän alipaine säädettiin vakioksi 25 Pa. Polttimessa ei ollut tulta eikä haketta. Tulokset on esitetty kuviossa 18.



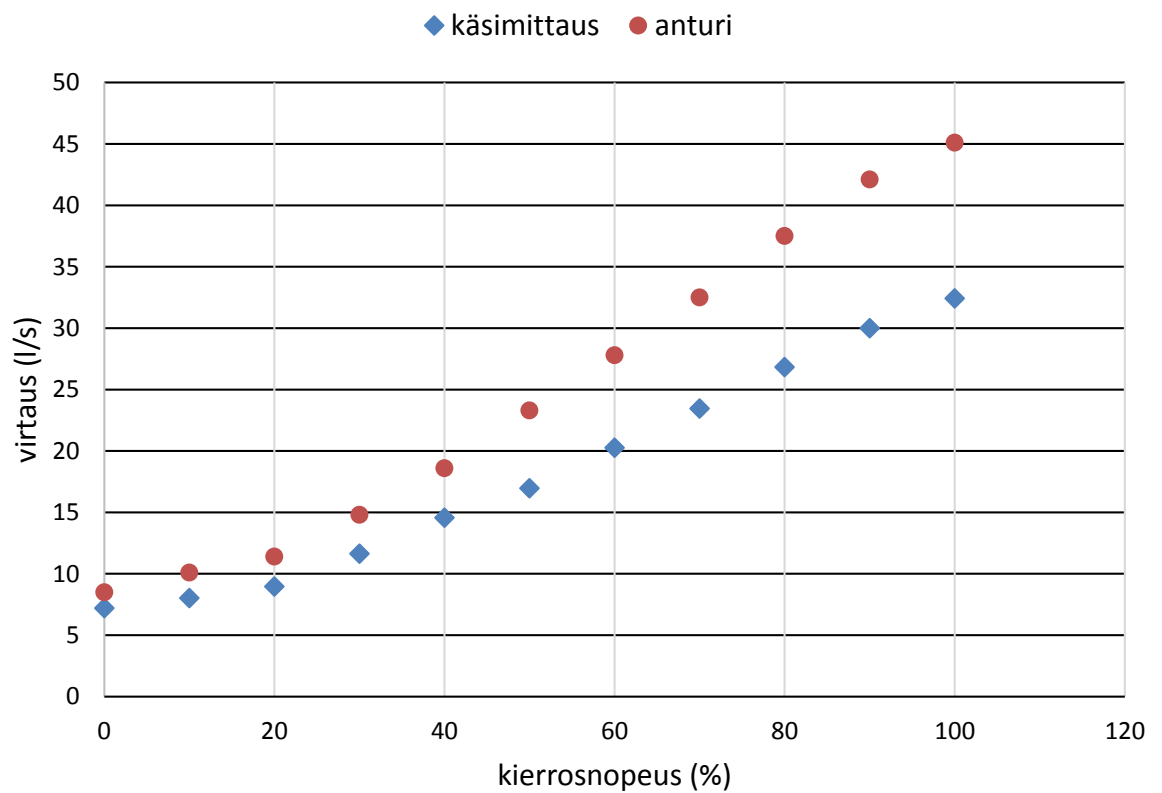
Kuvio 18. Kierrosnopeuden vaikutus tilavuusvirtaan

Huomataan, että tilavuusvirta kasvaa pienillä pyörimisnopeuksilla hitaasti ja 30 % nopeudesta alkaen kasvu nopeutuu ja jatkuu lineaarisesti. Tilavuusvirran arvo ei alannollasta eli putkissa virtaa ilmaa vaikka puhaltimet eivät pyöri. Tämä johtuu tulipesän alipaineesta. Virtausnopeuden hitaampi kasvu pienillä pyörimisnopeuksilla johtuu tästä alipaineen aiheuttamasta virtauksesta. Kasvu näyttäisi hidastuvan myös 100 % kierrosnopeudella, mikä saattaa johtua siitä, että pyörteet virtauksessa voimistuvat tai lisääntyvät ja aiheuttavat suuremman virtausvastuksen.

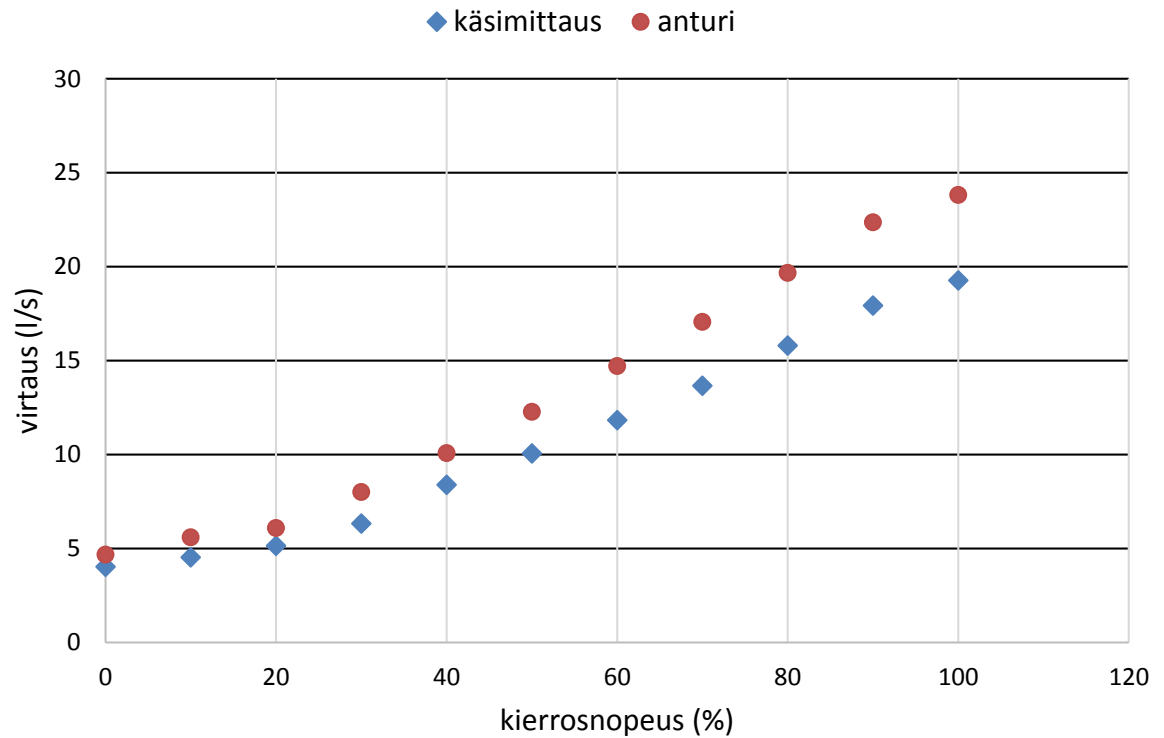
Tärkeä havainto on, että toisioilman tilavuusvirta on samoilla pyörimisnopeuksilla huomattavasti ensiöilmaa pienempi. Syyn selvittämiseksi mitattiin putkissa vallitseva staattinen paine. Kun virtaus oli molemmissa putkissa noin 24 l/s, oli ensiöpuhaltimen tuottama staattinen paine 56 Pa ja toisiopuhaltimen 310 Pa. Tästä voidaan päätellä, että toisioilman pienempi virtaus johtune suuremmasta virtausvastuksesta.

5.3 Mittausten todentaminen käsikäyttöisellä pitot-putkella

Antureilla mitattuja arvoja verrattiin käsikäyttöisellä L-tyypin pitot-putkella mitattuihin. Mittaustulokset ovat kuvioissa 19 ja 20.



Kuvio 19. Anturin ja käsimittauksen vertailu, ensiöpuhallin

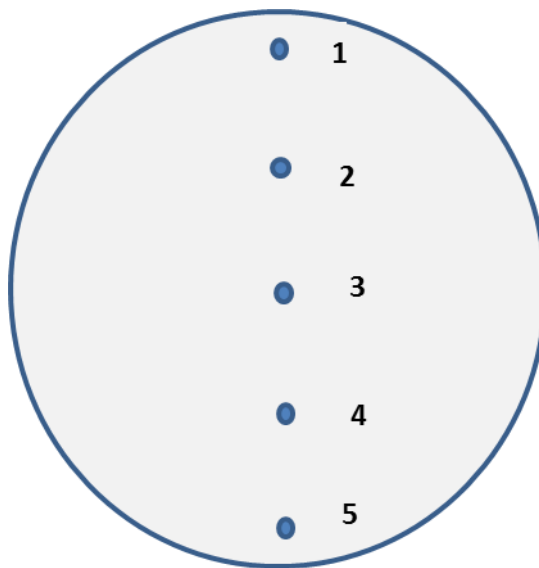


Kuvio 20. Käsimittauksen ja anturin vertailu, toisiopuhallin

Havaittiin, että anturilla saadaan suurempi tilavuusvirta kuin L-tyypin pitot-putkella. Varsinkin suurilla kierrosnopeuksilla ero on merkittävä. Käsimittaus tehtiin putken keskeltä, jossa virtausnopeuden pitäisi teoriassa olla suurin, joten havainto on päinvastainen kuin oli odotettavissa.

Virtausnopeuden vaihtelu eri kohdissa putken halkaisijalla mitattiin viidestä pisteestä (ks. kuvio 21 ja taulukko 1). Ensiöpuhaltimen kierrosnopeus oli 70 % ja toisiopuhaltimen 100 %.

Taulukko 1. Tilavuusvirta mittauspisteissä



	ensiö	toisio
	l/s	l/s
1	22,43	16,33
2	22,94	17,23
3	23,54	18,88
4	24,11	18,14
5	26,37	18,1

Kuvio 21. Mittauspisteiden sijainti

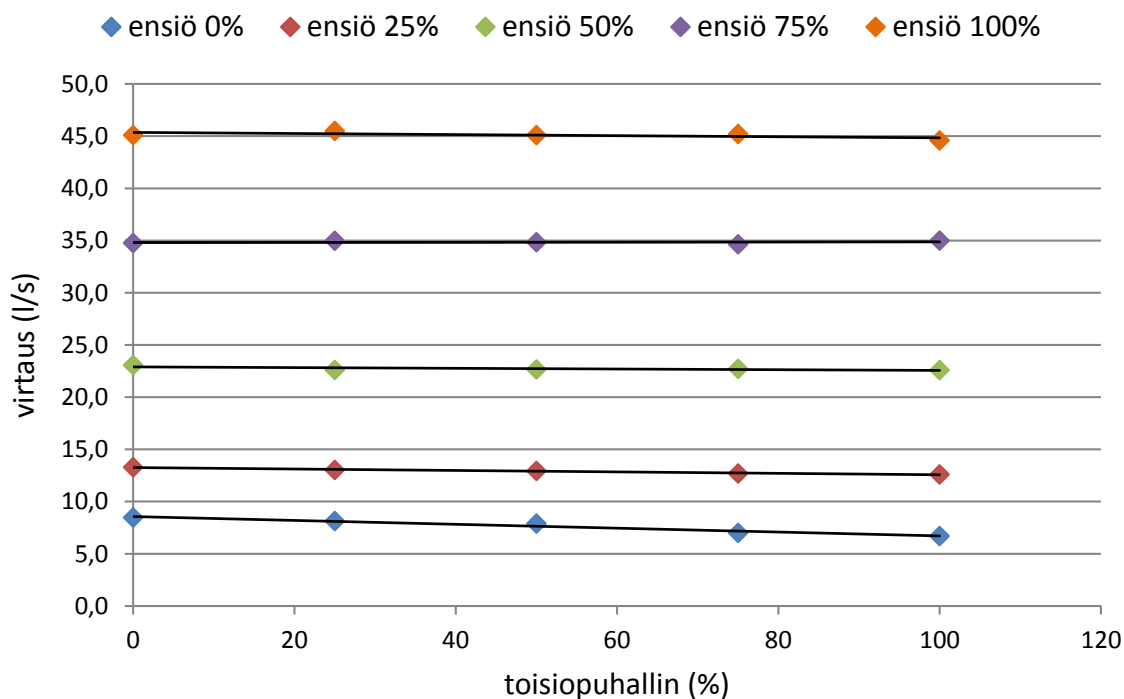
Ensiöilman mittausputkessa virtaus on suurimmillaan putken alareunassa ja toisioilman mittausputkessa keskellä putkea. Se, että suurin virtausnopeus on putken alareunassa, johtunee siitä, että mittauspaikka on niin lähellä puhallinta, eikä virtaus ehdi asettua normaalin virtausprofiilin mukaiseksi.

Anturilla ja käsimittauksella saatujen arvojen ero ei kuitenkaan selity tällä virtausprofiilin muodolla, koska toisioilman nopeus on suurin putken keskellä ja ensiöilmalla suurinkin L-tyypin pitot-putkella mitattu arvo on pienempi kuin anturilla mitattu. S-tyypin pitot-putki on herkempi putken asennosta johtuville mittausvirheille, mutta väärä asento ei aiheuta näin suurta eroa. Erot mittauksissa johtunevat mittausvälineiden erilaisista ominaisuuksista.

5.4 Puhaltimien keskinäinen vaikutus

Työssä tutkittiin myös puhaltimien vaikutusta toisiinsa. Tämä toteutettiin niin, että toisen puhaltimen pyörimisnopeus pidettiin samana, ja toisen nopeutta muutettiin.

Kuviossa 22 on pystyakselilla ensiöpuhaltimen tuottama tilavuusvirta ja vaaka-akselilla toisiopuhaltimen pyörimisnopeus.

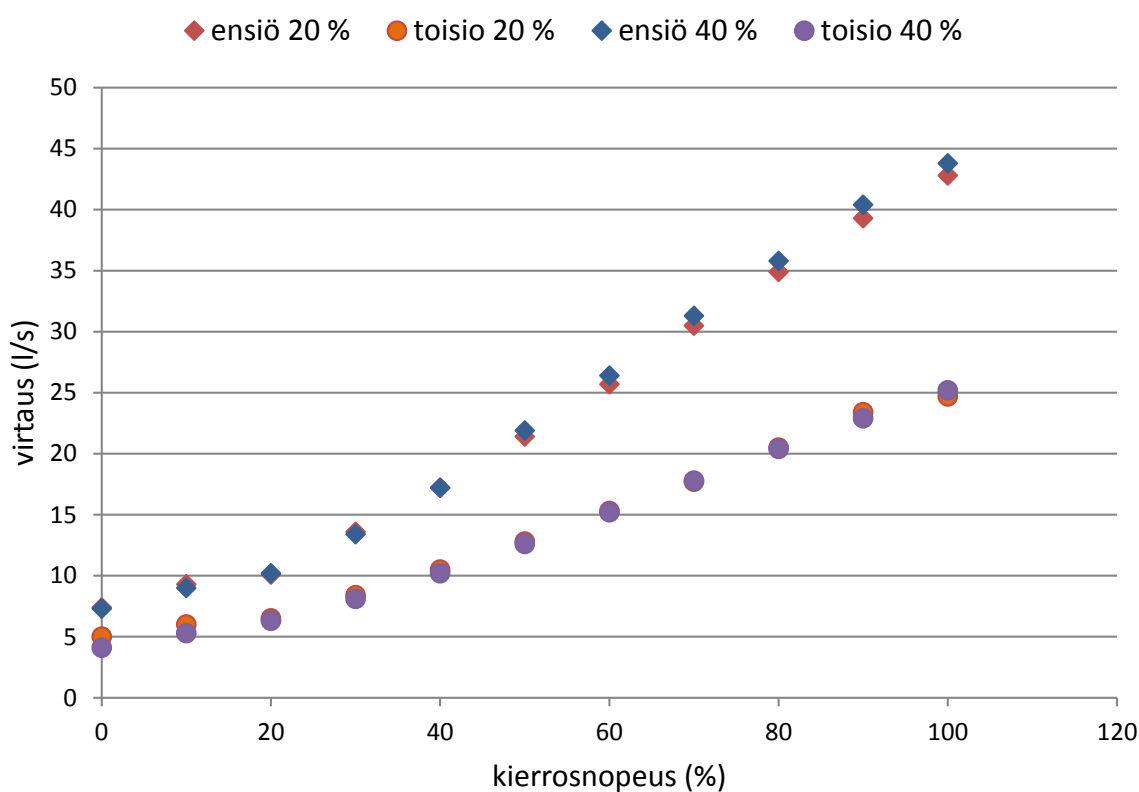


Kuvio 22. Puhaltimien keskinäinen vaikutus, ensiöpuhallin

Puhaltimilla ei näytä olevan merkittävää vaikutusta toistensa tuottamaan tilavuusvirtaan. Ainoastaan pienillä kierrosnopeuksilla toisioilman lisääminen vähentää hieman ensiöilman virtausta. Virtauksen pieneneminen kummankin puhaltimen käydessä 100 % nopeudella aiheutuu siitä, että savukaasuimurin teho ei riittänyt pitämään tulipesässä samaa alipainetta. Toisioilman määrään on puhaltimien keskinäinen vaikutus vieläkin vähäisempi.

5.5 Polttoaineen kosteuden vaikutus

Kokeiltiin myös polttoaineen kosteuden vaikutusta ilman virtaukseen. Mittaukset tehtiin kosteudeltaan 20 ja 40 %:in hakkeelle. Tulokset ovat kuviossa 23.



Kuvio 23. Polttoaineen kosteuden vaikutus

Kosteudella ei näytä olevan merkittävää vaikutusta virtaukseen. Suurilla kierrosnopeuksilla on ensiöilman virtausnopeus kosteammalla hakkeella hieman suurempi, mikä on vastoin odotuksia, sillä kostean hakkeen oletettiin aiheuttavan suurempi virtausvastus. Tämä saattaa kuitenkin selittyä erilaisella polttoainepatjan paksuudella mittausten välillä. Toisioilman virtaukseen ei polttoaineen laadulla ja määrällä ole vaikutusta, koska toisioilma syötetään polttoainepatjan yläpuolelle.

5.6 Polttokokeet

Polttokokeissa tavoite oli saavuttaa mahdollisimman täydellinen palaminen, eli savukaasun jäännöshapen on oltava alhaalla ja häkäpitoisuuden mahdollisimman pieni. Polttimen valmistajan antamat tavoitearvot hakkeen palamiselle ovat jäännöshapelle 7-9 % ja häkäpitoisuudelle 100–400 ppm (Arterm Oy 2013, 14). Tuhkasta määritettiin palamattomien osuus.

Ensimmäisessä kokeessa kattilateho oli 44 kW. Polttoaine oli koivuhaketta, jonka kosteus oli 18 %. Savukaasujen happipitoisuus oli 8,8 % ja häkä 45 ppm, mikä tarkoittaa hyvin puhdasta palamista ja pientä ilmaylimäärää. Tässä kokeessa syntyneestä tuhkasta ei määritetty tarkkaa palamattomien osuutta, mutta silmämääräisesti arvioiden se oli hyvin pieni, joten päästiin lähelle täydellistä palamista. Parhaat palamisilman syöttöarvot haettiin kokeilemalla, ja puhtain palaminen saavutettiin kun sekä ensiö- että toisioilman virtaus oli 11 l/s. Haketta kului noin 16 kg/h.

Jos kaikki tulipesään syötetty happi reagoisi polttoaineen hiilen ja vedyn kanssa muodostaen vain hiilidioksidia ja vesihöyryä, ilmaa tarvittaisiin yhteensä 15,9 l/s kun polttoaineenkulutus on 16 kg/h. Todellisen ja teoreettisen ilmamäärän suhde eli ilmakerroin oli siis $(2 \cdot 11 / 15,9) \text{ l/s} \approx 1,4$. Teoreettisen ilmantarpeen laskentaan käytettiin Marjukka Nuutisen palamisilma- ja savukaasulaskuria (Nuutinen, 2015). Laskentaan käytetty koivun alkuainekoostumus on VTT:n tiedotteesta Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia (Alakangas 2000).

Toisessa kokeessa polttoaine oli myös koivuhaketta, mutta palakoko oli hieman paksumpi kuin ensimmäisessä kokeessa, ja kosteus oli noin 11 %. Näin pieni kosteusprosentti johtuu siitä, että hake oli ollut pitkään sisällä. Näyte, josta kosteusanalyysi tehtiin, oli kuitenkin otettu säkin pintaosasta, jossa hake oli kuivinta. Tämä aiheuttanee pientä virhettä teoreettisen ilmantarpeen laskennassa. Kattilateho oli 40 kW, jäännöshappi 9,6 % ja häkä 176 ppm. Häkäpitoisuus oli edelleen melko pieni, mutta tuhkatilaan päätyi enemmän palamatonta polttoainetta kuin ensimmäisessä

kokeessa. Palamiskelpoisen aineen osuus tuhkatilaan pudonneesta tuhkasta oli noin 85 % ja lentotuhkasta 48 %.

Ensiö- ja toisioilman virtaus oli 13,6 l/s ja polttoaineenkulutus noin 16 kg/h.

Teoreettinen palamisilmantarve olisi 17,3 l/s. Ilmakertoimeksi saadaan 1,6.

Täydellisemmän palamisen saavuttamiseksi täytyisi ilmakerrointa kuitenkin tästä vielä nostaa.

Kolmannessa kokeessa ilmakerroin oli 2,9. Palavan aineen osuus tuhkassa pieneni hieman, se oli 73 %. Häkäpitoisuus oli kuitenkin suuri, 526 ppm ja happi 11,6 %. Liian suuri palamisilman määrä saattoi jäähdyttää tulipesää ja siten aiheuttaa epäpuhtaamman palamisen. Kattilateho oli 29 kW, ensiöilman virtaus 11,6 l/s ja toisioilman 13,1 l/s. Teoreettinen palamisilmantarve oli 8,6 l/s polttoaineenkulutuksen ollessa 8 kg/h. Hake oli samaa kuin toisessa kokeessa.

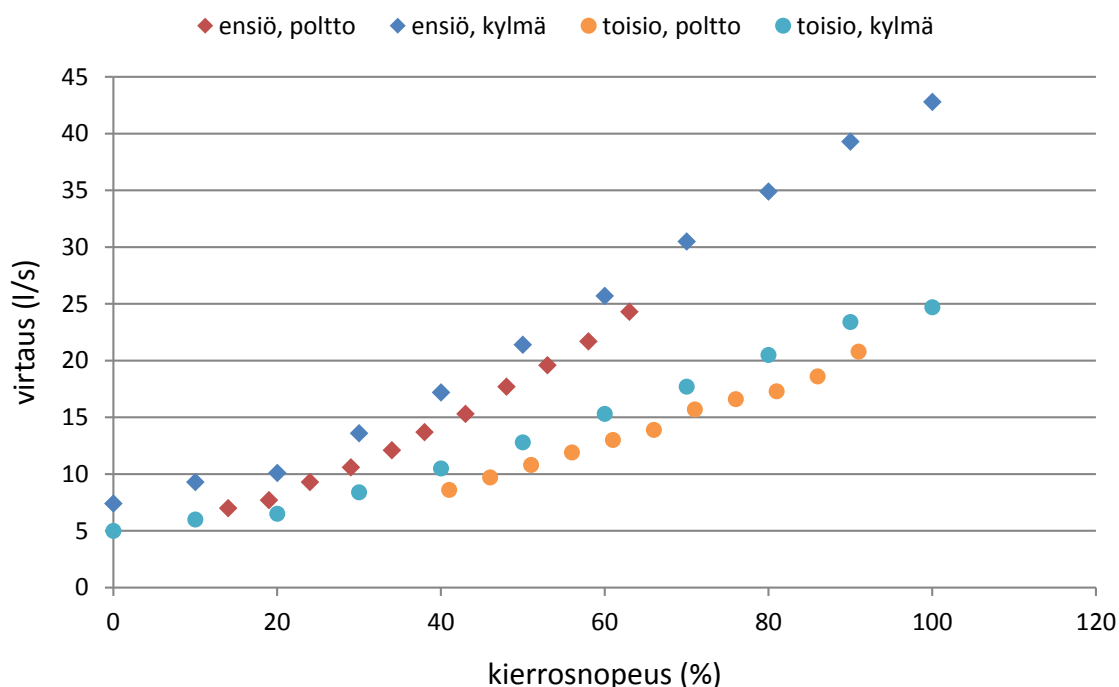
Neljäs polttokoe tehtiin 11 kW:n kattilateholla. Hake oli samaa kuin toisessa kokeessa, mutta kosteus oli 21 %. Savukaasujen happipitoisuus oli 12 % ja häkä 834 ppm. Tuhkaa syntyi niin vähän, että siitä ei näytettä saanut otettua. Palamatonta ainetta ei tuhkassa näyttänyt olevan juuri lainkaan. Haketta kului noin 6 kg/h. Ensiöilman virtaus oli 4,4 l/s ja toisioilman 4,9 l/s. Teoreettinen ilmantarve olisi 5,7 l/s, jolloin ilmakertoimeksi saadaan 1,6. Taulukossa 2 on yhteenveto polttokokeiden tuloksista.

Taulukko 2. Polttokokeiden tulokset

koe	teho (kW)	polttoaineen kosteus (%)	ensiö/toisio (l/s)	ilmakerroin	CO (ppm)	O ₂ (%)	palamiskelpoinen aine arinatuhkassa (%)
1	44	18	11,0 / 11,0	1,4	45	8,8	vähän
2	40	11	13,6 / 13,6	1,6	176	9,6	85
3	29	11	11,6 / 13,1	2,9	526	11,6	73
4	11	21	4,4 / 4,9	1,6	834	12	vähän

Saadut ilmakertoimet vaikuttavat enimmäkseen järkeviltä, sillä arinapolton ilmakerroin on yleensä noin 1,3–1,4 (Blomberg 2005, 39). Ilmakertoimet laskettiin myös tulisijojen mittaustandardiin perustuvalla laskurilla, joka laskee ilmakertoimen savukaasujen happipitoisuuden perusteella. Laskurilla lasketut kertoimet olivat, kolmatta koetta lukuun ottamatta, suurempia kuin mittausten perusteella saadut. Erot vaihtelivat välillä 0,1-0,95, ja niiden keskiarvo on 0,5. Oletettavasti laskuri antaa oikeamman tuloksen, koska sen antamaan tulokseen eivät vaikuta polttoaineen kulutus ja kosteus, joiden epätarkka mittausta aiheutti virhettä itse laskettuihin kertoimiin vaikuttamalla teoreettiseen ilmantarpeeseen.

Tutkittiin myös, vaikuttaako palaminen palamisilmojen virtaukseen, eli voidaanko kylmällä polttimella tehtyjä mittauksia hyödyntää palamisen hallinnassa. Kuviossa 24 verrataan ilman virtausta kylmällä polttimella ja palamisen aikana. Kattilateho oli 38 kW ja alipaine oli sama 25 Pa kaikissa mittauksissa. Polttoainepatjan vaikutus tuloksiin poistettiin syöttämällä kerros haketta myös kylmälle polttimelle.



Kuvio 24. Virtaukset kylmällä polttimella ja palamisen aikana

Mittauspisteiden muodostama käyrä on lähes samanlainen sekä kylmällä polttimella, että polttokokeen aikana. Palamisen aikana tilavuusvirran arvot ovat kuitenkin hieman pienempiä. Ensiöilman virtaukseen saattaa vaikuttaa arinalle kertyvä tuhka.

Kokeiltiin myös tulipesän alipaineen vaikutusta virtauksiin (ks. taulukko 3).

Taulukko 3. Alipaineen vaikutus virtaukseen

ensiö			toisio			
%	l/s		%	l/s		alipaine (Pa)
39	14,1		66	14		25
39	14,7		66	13,8		31
39	15,7		66	14,5		36
44	16,1		71	15,6		25
44	17,1		71	15,4		31

Alipaineen lisääminen suurentaa ensiöilman virtausta, mutta toisioilmaan ei tässä kokeessa alipaineella ollut juuri vaikutusta.

5.7 Mittausvirheet

Virhettä mittauksiin aiheuttaa se, että pitotputkimittausta ei paine-eromittarin käyttöohjeen mukaan suositella alle 5 m/s nopeuksilla, ja se on parhaimmillaan yli 10 m/s nopeuksilla. Nopeudet olivat enimmäkseen alle 10 m/s. Myös tuulen aiheuttama tulipesän alipaineen vaihtelu vaikuttaa virtausnopeuteen. Arinan asento vaikuttaa palamiseen ja polttoaineen ja tuhkan määrään arinalla ja siten myös ilman virtaukseen. Arinan toiminnassa oli häiriöitä kokeiden aikana, mikä luultavasti lisäsi tuhkan kertymistä arinalle ja haittasi palamista. Ovien aukominen aiheutti lämpötilan vaihteluita ja virtauksia hallissa, mikä vaikutti hieman virtauksiin ja ilman tiheyteen.

Polttoaineen kulutuksen mittaamisessa saattoi olla epätarkkuuksia, mikä aiheuttaa virhettä teoreettisen ilmantarpeen laskennassa. Myös hakkeen kosteus vaihteli säkin eri osissa, eikä kosteusnäyte välttämättä ollut täysin edustava. Kosteus vaikuttaa teoreettiseen ilmantarpeeseen, ja kosteuden vaihtelu polttoaineen kulutuksen mittaamiseen. Näiden teoreettisen ilmantarpeen laskennan epätarkkuuksien vuoksi ei ilmakertoimien perusteella voida tarkasti arvioida virtausmittausten toimivuutta.

Mittareiden DP-Calc ja Kimon S-putkiasetuksen välinen kerroin vaihteli hieman virtauksen mukaan, joten joillakin nopeuksilla kertoimen epätarkkuus aiheutti pientä virhettä kylmäajojen mittauksissa, joissa käytettiin molempia mittareita. Kyseenalaista on myös, onko Kimon S-putkiasetus sopiva kyseiselle anturille.

6 Yhteenveto

Työssä onnistuttiin selvittämään palamisilmapuhaltimien pyörimisnopeuden ja niiden tuottaman tilavuusvirran suhde sekä eri muuttujien vaikutukset virtauksiin ja arvioitiin anturien käytettävyyttä palamisen hallinnassa.

Anturien toimivuuden arvioimiseksi mittauksia verrattiin käsikäyttöisellä L-tyypin pitot-putkella tehtyihin mittauksiin. Mittaustuloksissa oli melko suuri ero. Työssä ei selvinnyt, kumpi mittauksista on luotettavampi, mutta tärkeintä ei kuitenkaan ole tarkkojen ilmamäärien tietäminen, vaan niiden suhde ja muutokset säädettäessä.

Tärkein työssä tehty havainto on, että kyseisellä polttimella toisioilmaa virtaa paljon ensiöilmaa vähemmän samoilla puhaltimien pyörimisnopeuksilla. Käytettäessä kattilaa pienillä tehoilla, on myös hyvä tietää, että palamisilmaa virtaa tulipesään, vaikka puhaltimet eivät pyöri.

Selvitettiin myös polttoaineen kosteuden, tulipesän alipaineen ja puhaltimien keskinäinen vaikutus virtauksiin. Polttokokeissa kokeiltiin anturien käytettävyyttä palamisen hallinnassa.

Mittauksista on hyötyä palamisilmojen säätämisessä, koska niiden avulla nähdään säätöjen vaikutusten suuruus virtauksiin. Tuhkan kertyminen arinalle ja arinan asento saattavat myös vaikuttaa virtaukseen, jolloin ilmamäärä vaihtelee, vaikka puhaltimien pyörimisnopeus ei muutu. Mittareilla voidaan myös huomata mahdolliset häiriöt ilman syötössä, joita voi aiheuttaa esimerkiksi arinan ilma-aukkojen tukkeutuminen. Polttokokeissa huomattiin, että palaminen on puhtainta, kun ensiö- ja toisioilmaa virtaa suurin piirtein yhtä paljon. Virtausten säätäminen yhtä suuriksi on vaikeaa ilman mittauksia.

Anturit osoittautuivat mielestäni toimiviksi ja niitä voidaan jatkossa käyttää palamisen hallinnan apuna. Mittausten avulla voidaan saavuttaa puhtaampi palaminen ja parempi hyötysuhde. Vastaavat anturit ja mittauskanavat tullaan mahdollisesti asentamaan myös laboratorion toiseen kattilaan. Anturit on helppo irrottaa ja asentaa, joten niitä voidaan siirtää kattilasta ja mittauskanavasta toiseen, eikä jokaista puhallinta varten tarvita omaa anturia. Samoin paine-eromittarin liittäminen anturiin on yksinkertaista, joten yhdellä mittarilla voidaan mitata useaa anturia. Vaikka puhaltimien säädöt tehdään kattilan kupeelta ohjausyksiköstä, mittaustulokset olisi myös hyvä saada näkymään valvomossa, koska virtaukset saattavat muuttua palamisen aikana.

Yhteistyö polttimen valmistajan kanssa voisi myös tulla kysymykseen, sillä palamisilman tilavuusvirran tarkempi tunteminen todennäköisesti auttaisi oikeiden säätöarvojen löytämisessä. Hyödynnettäessä tuloksia muihin polttimiin tulee muistaa, että virtauksen ja kierrosnopeuden suhde riippuu virtausvastuksesta ja siten vaihtelee eri poltinmallien välillä.

Lähteet

Airaksinen, L., Alakangas, E., Alanen, V-M., Kainulainen, S., Puhakka, A., Siponen, T., Soini, R. 2001. Hakelämmitysopas. Motiva, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Helsinki, Joensuu.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Alakangas, E., Erkkilä, A. & Oravainen, H. 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys, Polttopuun tuotanto ja käyttö. Jyväskylä: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf>

Ariterm Oy. 2011. Arimax biolämpölaitteiden tekninen erittely.

Ariterm Oy. 2013. Multijet-polttimen käyttöohje.

Ariterm Oy. 2014. Biolämpöopas.

Ariterm Oy. N.d. Lämmitysratkaisut, biokomponentit, biopolttimet. Viitattu 15.4.2015. <http://www.ariterm.fi/lammitysratkaisut/jarjestelmakomponentit/biopolttimet/multijet/>.

Blomberg, P. 2005. Kattilalaitoksen polttotekniikat ja ilmajärjestelmät. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Viitattu 9.4.2015. <https://www.theseus.fi>.

Flyktman, M., Impola, R. & Linna, V. 2012. Kotimaisia polttoaineita käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Energiateollisuus, Ympäristöministeriö. Suositus. Viitattu 30.3.2015. <http://www.ym.fi/download/noname/%7B200B1E69-09BB-4654-8DBC-F67274431193%7D/30742>

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusittu painos. Helsinki: Edita. Opetushallitus.

Ilmanlaatuportaali. N.d. Tietoa ilmansaasteista, ilmansaasteet, PAH-yhdisteet. Viitattu 7.3.2015. <http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/komponentit/pahit.html>.

Isometsä, J. 2013. Putket ja pumput. Luentomateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Jätelaitosyhdistys. 2006. Energiahyödyntäminen, arinapoltto. Viitattu 29.4.2015. [Http://www.jly.fi](http://www.jly.fi).

Kokko Control. N.d. Tuotteet, puhaltimet. Viitattu 2.5.2015. [Http://www.kokko-control.fi/tuotteet/puhaltimet](http://www.kokko-control.fi/tuotteet/puhaltimet).

Motiva. N.d. Etusivu, toimialueet, uusiutuva energia, bioenergia, bioenergian tuotantotekniikka, polttotekniikka kiinteille polttoaineille, arinapoltto. Viitattu 6.3.2015. http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/polttotekniikka_kiinteille_polttoaineille/arinapoltto.

Nuutinen, M. 2015. Palamisilma- ja savukaasulaskuri. Luentomateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. 2. uud. p. Helsinki: Opetushallitus.

Päästömittausten käsikirja osa 1. 2007. Päästömittaustekniikan perusteet. VTT Prosessit. Viitattu 30.3.2015. <http://www.isy.fi/osa1.pdf>

SFS-EN 13284-1. 2005. Kiinteät päästölähteet. Pienten hiukkaspitoisuuksien määrittäminen. Osa 1: Manuaalinen gravimetrinen menetelmä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Viitattu 30.3.2015. <http://www.jamk.fi/kirjasto>, Nelli-portaali, SFS Online.

Valtanen, E. 2009. Tekniikan taulukkokirja. 17. p. Genesis-Kirjat.

Vertainen, L. 2014. Maaseudun energiahuolto. Luentomateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Biotalousinstituutti.

Wiksten, R. 2009. Virtauskoneet. Teknillinen korkeakoulu. Sovelletun termodynamiikan laboratorio. Espoo 1995. 3. korj. p. Otaniemi.